



ΑΝΩΤΑΤΗ
ΣΧΟΛΗ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

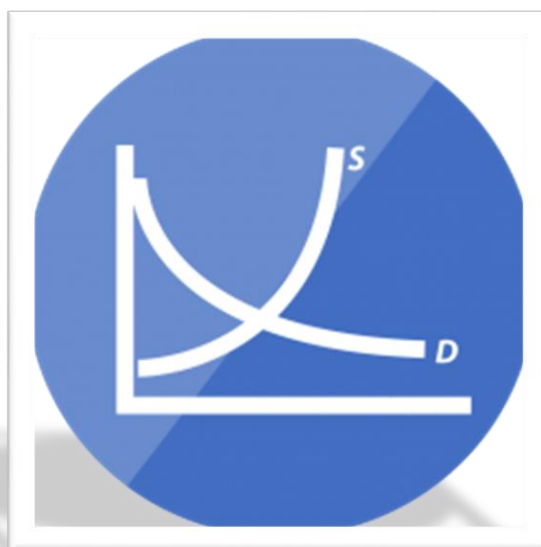
ΑΣΠΑΙΤΕ

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΚΑΤΕΘΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ (nonlinear programming) ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ**



ΦΛΩΡΑ Κ. ΜΗΤΑΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΔΡΙΤΣΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ

Μαρούσι, Νοέμβριος 2016

Περιεχόμενα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΜΕΘΟΔΟΙ	8
1: ΒΑΣΙΚΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	9
1.1: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ	9
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΑΓΟΡΩΝ	9
ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ- ΖΗΤΗΣΗ	9
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ	9
ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ	10
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ : ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ	11
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ	12
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑΣ	12
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ-ΚΟΣΤΟΣ ΕΥΚΑΙΡΙΑΣ	13
Η ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ	13
ΤΑ ΕΣΟΔΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ	13
ΙΣΟΡΡΟΠΙΕΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ	13
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ PARETO	13
ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΥΗΜΕΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΝΕΚΡΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (GLOBAL WELFARE & DEADWEIGHT LOSS) ..	14
ΕΣΟΔΑ- ΕΞΟΔΑ	14
ΤΥΠΟΙ ΑΓΟΡΩΝ	15
ΑΓΟΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ (SPOT MARKET)	15
ΠΡΟΘΕΣΜΙΑΚΕΣ ΑΓΟΡΕΣ	15
ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ (FUTURE MARKETS)	16
ΣΥΜΒΟΛΑΙΑ	16
1.2: ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	17
ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	17
ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	17
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	17
ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ	17
ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ, ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΙΣΧΥΟΣ	18
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	18

ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΖΥΓΩΝ	18
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ	19
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ	20
ΑΠΩΛΕΙΕΣ.....	20
ΚΟΜΒΙΚΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ	21
1.3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΟΣ ΒΑΡΕΛΙΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΜΙΑ ΚΙΛΟΒΑΤΤΩΡΑ	22
Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΜΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ.....	23
ΑΝΟΙΧΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΑΓΟΡΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	24
ΔΙΜΕΡΕΙΣ ΣΥΝΑΛΛΑΓΕΣ.....	24
ΙΔΕΑΤΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	25
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ	26
ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΠΟΡΩΝ	26
ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΠΟΡΤΑΣ (GATE CLOSURE).....	27
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ.....	27
Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ	28
1.4: ΚΟΣΤΗ	30
ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ ΕΙΣΡΟΕΣ- ΕΚΡΟΕΣ (INPUTS - OUTPUTS).....	30
ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (SHORT RUN).....	30
ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ.....	32
ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (LONG COSTS)	32
ΣΤΑΘΕΡΑ ΚΟΣΤΗ (FIXED COSTS)	32
ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΚΟΣΤΗ (VARIABLE COSTS).....	32
2: ΒΑΣΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ	34
2.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	34
ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΙΣ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ	36
ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	39
ΕΛΑΦΡΥ ΥΔΩΡ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ	40
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ.....	41
2.2: ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ/ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	44
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	44
ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ.....	47
3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	51
3.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	51
3.2: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ	53

3.2.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΥΠΟ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ	55
3.3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ (ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ)	57
3.3.1 Ο ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ «λ Επανάληψης»	58
3.3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΝΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ- ΦΥΣΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ <i>μimin, μimax</i>	61
3.3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	62
3.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	64
3.4: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	72
3.4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	73
3.5: ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	75
3.5.1: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΙΣΟΤΗΤΑΣ	75
3.5.2: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΙΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΝΙΣΟΤΗΤΑΣ	77
3.5.3: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΙΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΝΙΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	78
4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ	80
4.1: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	80
4.2: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ	81
4.2.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ	81
4.2.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ	82
4.2.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (UNIT COMMITMENT UC)	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	86
Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ Η ΣΥΝΤΑΞΗ ΤΗΣ ΕΝΤΟΛΗΣ «fmincon»	86
ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Price Elasticity Demand	Ελαστικότητα Της Ζήτησης
Price Elasticity Of Supply Or Price Elasticity Of Demand	Ελαστικότητα Της Προμήθειας
Perfectly Competitive Market	Τέλεια Ανταγωνιστική Αγορά
Equilibrium Market Or Market Clearing Price	Ισορροπία Της Αγοράς
Inputs- Outputs	Έσοδα-Έξοδα
Liquid Market	Ρευστή Αγορά
Spot Market	Αγορά Άμεσης Παράδοσης
Managed Spot Market	Διαχείριση Της Αγοράς Άμεσης Παράδοσης
Spot Price	Άμεση Τιμή
Future Contracts	Μελλοντικές Συμβάσεις
Calls And Puts	Συμβόλαια Επιλογής
Contracts Of Difference	Συμβάσεις Για Διαφορές
Short Run	Βραχυχρόνια Περίοδος Διόρθωσης Παραγόντων Της Παραγωγής
Long Cost	Μακροχρόνια Περίοδος Διόρθωσης Των Παραγόντων Της Παραγωγής
Fixed Costs	Σταθερά Κόστη
Variable Costs	Μεταβλητά Κόστη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η διατριβή παρουσιάζει ένα πλαίσιο για τις θεμελιώδεις έννοιες και μεθοδολογίες ηλεκτρική οικονομία. Η διατριβή ξεκινά με την παρουσίαση των θεμελιωδών ιδεών από οικονομικές επιστήμες και στη συνέχεια επικεντρώνεται στο πρόβλημα της «Βέλτιστη Οικονομική Κατανομή» των Θερμικών Σταθμών. Η προτεινόμενη ρύθμιση βασίζεται σε μαθηματική βελτιστοποίηση (μη γραμμικού προγραμματισμού) και τα βασικά εργαλεία είναι τα εξής: Η Lagrangian προσέγγιση για τα συστήματα με περιορισμούς ισότητας και της Karush Kuhn Tucker (KKT) για τη βελτιστοποίηση συστημάτων με περιορισμούς ανισότητας. Αυτή η "βελτιστοποίηση" με βάση την προσέγγιση προσπαθεί να επιτύχει ένα εμπόριο μεταξύ των επιχειρησιακών και των καυσίμων, την ελαχιστοποίηση του κόστους και την επίτευξη των επιπέδων ζήτησης και τηρώντας τα όρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντικειμενική συνάρτηση του κόστους αποτελείται από τη λειτουργία ωριαίου κόστους του εργοστασίου, η ισχύς που απαιτείται από το φορτίο, τα όρια της γεννήτριας, οι απώλειες κατά τη μεταφορά και, ενδεχομένως, τα όρια ισχύος γραμμής διασύνδεσης.

Εκτός από μερικά ακαδημαϊκά παραδείγματα τη βελτιστοποίησης, είναι μερικά ρεαλιστικά αριθμητικά παραδείγματα που δείχνουν την πρακτική εφαρμογή των προτεινόμενων διαδικασιών βελτιστοποίησης σε προβλήματα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου. Αυτά τα παραδείγματα αφορούν [1] Βέλτιστη Οικονομική Κατανομή Φορτίων Με Περιορισμούς Ισότητας, [2] Βέλτιστη Κατανομή Φορτίων Με Περιορισμούς Ισότητας Και Όρια Παραγωγής Ισχύος, και [3] Βέλτιστη Κατανομή Φορτίων Με Περιορισμούς Ισότητας Και Απώλειες Μεταφοράς. Οι προσομοιώσεις παρουσιάζονται βασίζονται σε τυποποιημένο λογισμικό προσομοίωσης.

ABSTRACT

This thesis presents a framework for fundamental electrical economy concepts and methodologies. The thesis starts with the presentation of fundamental ideas from economic sciences and then focuses on the problem of "Optimal Economic Dispatch" of thermal Power Plants. The proposed setup is based on mathematical optimization (nonlinear programming) and the basic tools are: The Lagrangian approach for systems with equality constraints and the Karush Kuhn Tucker (KKT) for optimization with inequality constraints. This "optimization-based" approach attempts to achieve a trade-off between operational & fuel cost minimization and meeting the demand levels while respecting the power generation limits. The monetary cost objective function consists of the plant's hourly cost function, the power demanded from the load, the generator limits, the transmission losses and possibly the tie-line power limits.

Apart from a few academic examples on optimization, a few realistic numerical examples are presented showing the practical application of the proposed optimization procedures in Economic Dispatching problems. These examples concern [1] Optimal Dispatching with equality constraints [2] Optimal Dispatching with equality constraints and power generation limits. constraints [3] Optimal Dispatching with equality constraints and transmission losses. The presented Simulations are based on standard simulation software.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τι είναι η Βελτιστοποίηση:

Ένα ευρύ σύνολο αλληλένδετων αποφάσεων σχετικά με την απόκτηση, τη λειτουργία και τη διατήρηση φυσικών και ανθρώπινων πόρων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφοράς και διανομής, που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε όλες τις κατηγορίες καταναλωτών, με την επιφύλαξη της μηχανικής, της αγοράς, και κανονιστικούς περιορισμούς.

Η Βελτιστοποίηση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει ως στόχο την βελτίωση σε περισσότερες περιοχές του κόστους:

- *Αξιοπιστία:* με τη μείωση του κόστους των διακοπών και διαταραχές της ποιότητας ισχύος, μειώνονται η πιθανότητα, οι συνέπειες της διαδεδομένης διακοπής ρεύματος.
- *Οικονομικά:* κρατώντας σε χαμηλά επίπεδα τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας το καταβαλλόμενο ποσό των καταναλωτών σε σύγκριση με το "business as usual" (BAU) του δικτύου, δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και την τόνωση της οικονομίας.
- *Αποδοτικότητα:* με τη μείωση του κόστους παραγωγής, παράδοσης, και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- *Φιλικότητα Προς Το Περιβάλλον:* με τη μείωση των εκπομπών σε σύγκριση με BAU, επιτρέποντας μια μεγαλύτερη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης.
- *Ασφάλεια:* με τη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενη ενέργεια, καθώς και την πιθανότητα και τις συνέπειες των ανθρωπογενών επιθέσεων και φυσικές καταστροφές.

ΜΕΘΟΔΟΙ

Η «*MATLAB*» είναι μια γλώσσα υψηλού επιπέδου και διαδραστικό περιβάλλον για αριθμητικούς υπολογισμούς, απεικόνιση, και τον προγραμματισμό. Το *MATLAB* είναι ένα πλήρες περιβάλλον για τον προγραμματισμό υψηλού επιπέδου, καθώς και διαδραστική ανάλυση δεδομένων. Το *MATLAB* υπερέχει σε αριθμητικούς υπολογισμούς, ειδικά όταν ασχολείται με φορείς ή μήτρες των στοιχείων. Οι μαθηματικοί συμβολισμοί είναι διαθέσιμοι μέσω ενός *add-on εργαλειοθήκη* που χρησιμοποιούν έναν πυρήνα *MuPAD*. Υπάρχουν πολλές *add-on εργαλειοθήκες*, οι οποίες εκτείνονται *MATLAB* σε συγκεκριμένους τομείς της λειτουργικότητας, όπως οι στατιστικές, η χρηματοδότηση, η επεξεργασία σήματος, η επεξεργασία εικόνας, βιοπληροφορική, κ.λπ.. Για αυτή την εργασία, η *fmincon εργαλειοθήκη* χρησιμοποιείται για να βρούμε τις Βέλτιστες Τιμές των διαφορών μονάδων παραγωγής.

1: ΒΑΣΙΚΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε τη γενική ιδέα της θεωρίας της μικροοικονομίας που χρειάζεται να γνωρίζουμε τις αγορές της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, εκμεταλλευόμαστε αυτή την ευκαιρία για να εξηγήσουμε κάποια οικονομική ορολογία, η οποία είναι συχνότερη στην μηχανική βιβλιογραφία. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε πως η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι ένα απλό εμπόρευμα και η ηλεκτρικές αγορές είναι πιο πολύπλοκες από τις αγορές των άλλων προϊόντων. Για να αποφύγουμε περιττές επιπλοκές, συστήνουμε τις βασικές έννοιες της μικροοικονομίας χρησιμοποιώντας παραδείγματα που δεν σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια.

1.1: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΑΓΟΡΩΝ

Η αγορά είναι μία πολύ παλιά ανακάλυψη, που μπορεί να βρεθεί στους περισσότερους πολιτισμούς. Η αγορά σαν ιδέα ξεκίνησε από την *ύπαρξη ορισμένων ανθρώπων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, όπου γινότανσαν αγοραπωλησίες* προϊόντων μέσω της *ανταλλαγής προϊόντων*. Συνεχίζει στις μέρες μας να εξελίσσεται σε πραγματικά περιβάλλοντα όπου πληροφορίες κυκλοφορούν ηλεκτρονικά και οι συμφωνίες γίνονται με το «κλικ» ενός ποντικιού.

Η *Θεμελιώδης Αρχή της Αγοράς* παρόλη την πάροδο η ερμηνεία της έννοιας της αγοράς μένει ίδια, δηλαδή είναι ένα μέρος στο οποίο οι αγοραστές και οι πωλητές συναντιόνται για να δουν αν οι συμφωνίες μπορούν να πετύχουν.

Για να εξηγήσουμε τη λειτουργία των αγορών, αναπτύσσουμε ένα μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά των καταναλωτών. Έπειτα, αναπτύσσουμε ένα μοντέλο που εξηγεί τις δραστηριότητες των παραγωγών. Τέλος, συνδυάζοντας αυτά τα δύο μοντέλα θα είμαστε ικανοί να δείξουμε υπό ποιες προϋποθέσεις μπορούν να επιτευχθούν οι συμφωνίες.

ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ- ΖΗΤΗΣΗ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ

ΑΤΟΜΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ

Για να κατανοήσουμε την έννοια της *ατομικής ζήτησης*, ας ξεκινήσουμε με ένα παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι δουλεύουμε αρκετά κοντά σε μια λαϊκή αγορά, ώστε να μπορούμε να πεταχτούμε στο διάλειμμα. Οι αγρότες πουλάνε διαφορετικούς τύπους φρούτων και λαχανικών, σήμερα ψάχνουμε για μήλα. Ο αριθμός των μήλων που θα αγοράσουμε εξαρτάται από την τρέχουσα τιμή που έχει το μήλο. Υπάρχει η τιμή, η οποία είναι υψηλή, που θα μας βάλει να αποφασίσουμε αν θα αγοράσουμε το μήλο ή αν θα αλλάξουμε φρούτο. Αν η τιμή είναι λίγο χαμηλότερη, αλλά ακόμα υψηλή πιθανόν να αγοράσουμε ένα μήλο για το δρόμο επιστροφής από τη δουλειά. Αν είναι ακόμα χαμηλότερη θα αγοράσουμε ακόμα ένα για το μεσημεριανό. Για ακόμα χαμηλότερες τιμές θα αγοράσουμε περισσότερα μήλα για να κάνουμε μηλόπιτα. Αν η τιμή είναι κι άλλο χαμηλότερη θα υπάρξει η ευκαιρία να χρησιμοποιηθεί το μηχάνημα που έχεις για να φτιάξεις σαγκριά.

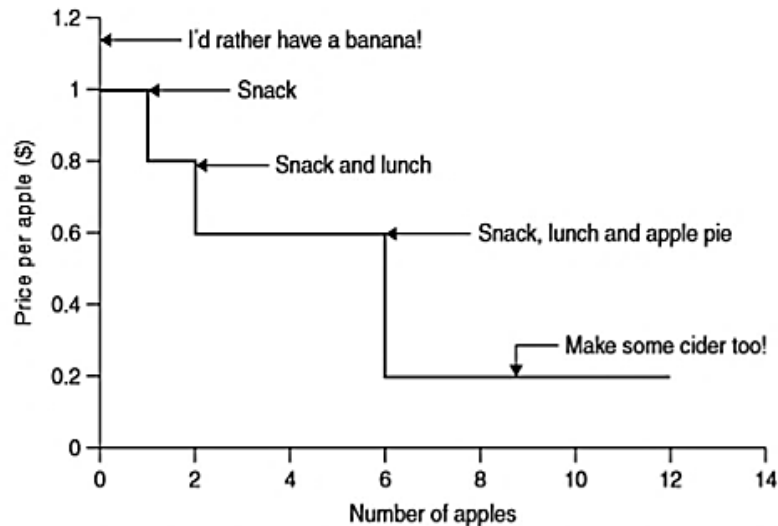


Figure 2.1 Typical relation between the price of apples and the demand of a particular customer

Η παραπάνω καμπύλη μας δείχνει τι θα πρέπει να είναι η τιμή για τον καταναλωτή για να αγοράσει το συγκεκριμένο ποσό. Είναι σχεδιασμένη υποθέτοντας ότι το εισόδημα του καταναλωτή και οι τιμές των άλλων προϊόντων είναι σταθερές.

Επίσης, η απόφαση που θα πάρουμε για την αγορά των μήλων πρέπει να επηρεάζεται από την ποιότητα από αυτών που είναι προς πώληση. Αυτό είναι ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να το προσέχουμε, υποθέτοντας ότι όλα τα non-price χαρακτηριστικά του εμπορεύματος (τύπος, μέγεθος και ποιότητα) είναι καθορισμένα.

ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ

Ας υποθέσουμε στο ίδιο παράδειγμα με τα μήλα, ότι όταν θα πάμε στην αγορά η τιμή θα είναι \$0,40 το κάθε μήλο. Σε αυτή την τιμή αποφασίζουμε να αγοράσουμε 6 μήλα (*figure 2.2*).

Υπολογίζουμε το *gross consumers' surplus* ή το ακαθάριστο πλεόνασμα των καταναλωτών που το επιτυγχάνουμε αγοράζοντας αυτά τα μήλα. Αυτό αντιπροσωπεύει τη συνολική αξία που αποδίδουμε σε αυτά τα μήλα.

Ο υπολογισμός έχει ως εξής:

Αξία του πρώτου μήλου	1*\$1.00=	\$1.00
Αξία του δεύτερου μήλου	1*\$0.80=	\$0.80
Αξία των επόμενων τεσσάρων μήλων	4*\$0.60=	\$2.40
Ακαθάριστο πλεόνασμα ή gross surplus		\$4.20

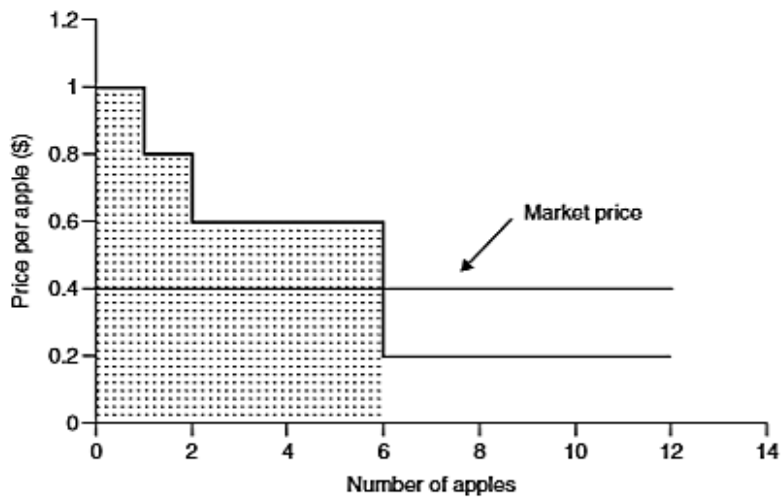


Figure 2.2 Gross surplus of purchasing apples

Ωστόσο, έπρεπε να καταβάλουμε $6 \cdot 0,40\$ = 2,40\$$ για να αγοράσουμε αυτά τα μήλα και αυτά αντιπροσωπεύουν τα λεφτά που δεν μπορούμε να έχουμε για άλλους σκοπούς. Ορίζουμε το *καθαρό πλεόνασμα του καταναλωτή* ή *net consumer's surplus* ως τη διαφορά του *ακαθάριστου κέρδους* μείον τα έξοδα για την αγορά των προϊόντων.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ : ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Είναι *απίθανο* όλοι οι καταναλωτές που θα πάνε στην αγορά να έχουν την ίδια επιθυμία με εσένα για τα μήλα. Μερικοί θα πληρώσουν περισσότερο για τον ίδιο αριθμό μήλων, ενώ άλλοι θα αγοράσουν μόνο όταν η τιμή των μήλων θα είναι χαμηλή.

Αν συναθροίσουμε τα χαρακτηριστικά ζήτησης από ένα επαρκώς μεγάλο αριθμό καταναλωτών, οι *ασυνέχειες που εισήγαγαν οι ασυνέχειες λειαίνονται*, οδηγώντας το σε μια καμπύλη όπως *Figure 2.4*. Η καμπύλη αυτή αντιπροσωπεύει *αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης* ή *inverse demand function* των καταναλωτών και λαμβάνεται σαν σύνολο.

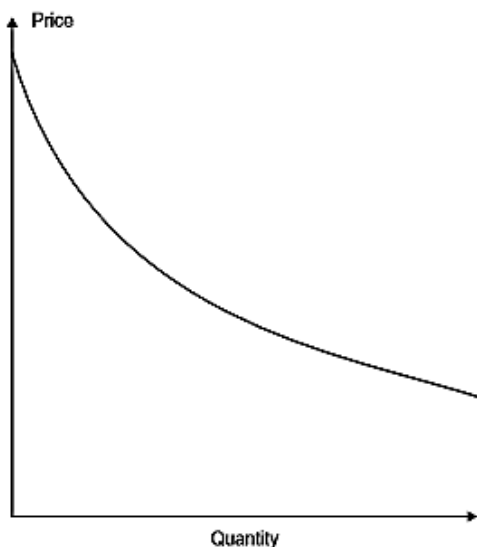


Figure 2.4 Typical relation between the price of a commodity and the demand for this commodity by a group of consumers. This curve is called the inverse demand function or the demand function depending on the perspective adopted

$$\pi = D^{-1}(q)$$

$\pi =$ τιμή εμπορεύματος

Demand function: $q = D(\pi)$ $q =$ ποσότητα

Η συνάρτηση είναι κεκλιμένη προς τα κάτω, γιατί το ποσό που καταναλώνεται μειώνεται, όσο αυξάνεται η τιμή. Η έννοιες χονδρική και πλεόνασμα των καταναλωτών: επεκτείνονται στη χονδρική και στα πλεονάσματα 1 ομάδας καταναλωτών. Η έννοια του καθαρού πλεονάσματος είναι σημαντικότερη απ' ότι ο υπολογισμός της απόλυτης τιμής, γι' αυτή την ποσότητα. Δεν είναι εύκολο να το υπολογίσουμε επειδή δεν είναι γνωστή η συνάρτηση.

ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Μια αύξηση της τιμής του εμπορεύματος επιφέρει τη μείωση της ζήτησης. Η μείωση της ζήτησης: $\frac{dq}{d\pi}$.

Η κλίση αυτή μας παρουσιάζει το πρόβλημα: η αριθμητική τιμή εξαρτάται από τις μονάδες που χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε την ποσότητα και την τιμή.

Price elasticity demand- Ελαστικότητα της ζήτησης:

$$\epsilon = \frac{\frac{dq}{q}}{\frac{d\pi}{\pi}} = \frac{\pi}{q} * \frac{dq}{d\pi}$$

Ελαστική ζήτηση: αν μια δοθείσα ποσοστιαία αλλαγή στην τιμή παράγει μια μεγαλύτερη ποσοστιαία αλλαγή στη ζήτηση. Αν η σχετική αλλαγή στη ζήτηση είναι μικρότερη απ' ότι στην τιμή, η ζήτηση λέγεται «όχι ελαστική». Αν η ελαστικότητα είναι ίση με -1 η ζήτηση ονομάζεται «μέχρι ελαστική».

Η ελαστικότητα της ζήτησης εξαρτάται σε μεγάλο μέρος από τη διαθεσιμότητα των υποκαταστάσεων. Ας υποθέσουμε ότι η ηλεκτρική θέρμανση είναι διαδεδομένη σε μια περιοχή. Στην short run η τιμή της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ χαμηλή, γιατί οι καταναλωτές δεν έχουν άλλη επιλογή από το αν θέλουν να μείνουν ζεστοί. Στην long run μπορούν να εγκαταστήσουν φυσικό αέριο και η τιμή ελαστικότητας της ζήτησης θα είναι υψηλότερη.

Η ελαστικότητα της ζήτησης εξαρτάται από τους αντικαταστάτες

$$\epsilon_{ij} = \frac{\frac{dq_i}{q_i}}{\frac{d\pi_j}{\pi_j}} = \frac{\pi_j}{q_i} * \frac{dq_i}{d\pi_j}$$

i: ζήτηση του εμπορεύματος, *j*: τιμή του εμπορεύματος

Όταν η ελαστικότητα του εμπορεύματος με τη δική του τιμή είναι πάντα αρνητική, η σταυροειδείς ελαστικότητες είναι ανάμεσα στα υποκατάστατα προϊόντα και είναι θετικές, γιατί μια αύξηση στην τιμή του ενός θα παρακινήσει τη ζήτηση για τα άλλα.

ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑΣ

Η αύξηση στην τιμή του εμπορεύματος ενθαρρύνει τους προμηθευτές να παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες αυτού του εμπορεύματος. Ο ορισμός της τιμής ελαστικότητας της προμήθειας είναι παρόμοιος με τον ορισμό της ελαστικότητας της ζήτησης, αλλά περιλαμβάνει την παράγωγο της καμπύλης της προμήθειας και όχι την καμπύλη της ζήτησης.

Price elasticity of supply or price elasticity of demand (ελαστικότητα της προμήθειας):

$$\varepsilon = \frac{\frac{dq}{q}}{\frac{d\pi}{\pi}} = \frac{\pi}{q} * \frac{dq}{d\pi}$$

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ-ΚΟΣΤΟΣ ΕΥΚΑΙΡΙΑΣ

Το Μοντέλο Της Συμπεριφοράς Των Καταναλωτών βασίζεται στην υπόθεση ότι μπορούν να επιλέξουν την ποσότητα του εμπορεύματος που αγοράζουν. Το επίπεδο κατανάλωσης είναι τόσο, που οι καταναλωτές παίρνουν από το εμπόρευμα. Το οριακό όφελος είναι ανάλογο της τιμής που πρέπει να πληρώσουν για να αποκτήσουν το εμπόρευμα αυτό.

Η ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΣ

Από το παράδειγμα με την πώληση των μήλων στην αγορά καταλαβαίνουμε ότι η τιμή πώλησης μπορεί να είναι:

1. Μικρότερη τιμή πώλησης από την τιμή παραγωγής
2. Τα έσοδα πώλησης_σε αυτή την αγορά_μπορεί να είναι λιγότερα, σε σύγκριση με τα έσοδα από άλλους σκοπούς πώλησης- χρήσης, όπως εργοστάσιο.

Αφίερωση των πηγών (χρημάτων, γης, μηχανημάτων, χρόνου) σε κάποια άλλη επένδυση, όπως καλλιέργεια αχλαδιών.

ΤΑ ΕΣΟΔΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ

Τα έσοδα των παραγωγών είναι ανάλογα με τη διαπραγματευόμενη ποσότητα q_1 , και το κόστος αγοράς π_1 . (*producers' revenue*)

Καθαρά έσοδα παραγωγών όλα τα αγαθά (εκτός της οριακής παραγωγής) διαπραγματεύονται σε μια τιμή, που είναι υψηλότερη από την τιμή ευκαιρίας. (*producers' profit or net surplus*)

ΙΣΟΡΡΟΠΙΕΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ

Αλληλεπίδραση παραγωγών- καταναλωτών ο παραγωγός ή ο καταναλωτής δεν επηρεάζει την τιμή με τις πράξεις του. Οι συμμετέχοντες της αγοράς παίρνουν την τιμή που τους δίνεται. Η αγορά ονομάζεται *perfectly competitive market* ή *τέλεια ανταγωνιστική αγορά*. Η υπόθεση αυτή δεν ισχύει στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Equilibrium market or market clearing price, αλλιώς *Ισορροπία Της Αγοράς ή Τιμή Εκκαθάρισης Της Αγοράς* π^* = η ποσότητα που οι προμηθευτές μπορούν να δώσουν, είναι ανάλογη με την ποσότητα που οι καταναλωτές θέλουν.

$$D(\pi^*) = S(\pi^*)$$

Η *ισορροπία της ποσότητας* $-q^*$ = η τιμή που οι καταναλωτές μπορούν να πληρώσουν για την ποσότητα, είναι ανάλογη της τιμής που οι παραγωγοί πρέπει να λαμβάνουν για να προμηθεύουν την ποσότητα.

$$D^{-1}(q^*) = S^{-1}(q^*)$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ PARETO

Όταν ένα σύστημα είναι υπό έλεγχο από έναν οργανισμό, ο οργανισμός προσπαθεί να βελτιστοποιήσει μερικά μέτρα που λαμβάνει από το σύστημα. Όταν όμως το σύστημα εξαρτάται από ποικίλους οργανισμούς με αποκλίνοντα ενδιαφέροντα, η συμβατική βελτιστοποίηση δεν είναι εφαρμόσιμη και αντικαθίσταται από

Pareto Efficiency. Pareto efficient: έχει και από τους δύο όρους της ποσότητας των αγαθών που ανταλλάσσονται την ανταλλασσόμενη ποσότητα q και την ποσότητα ισορροπίας q^* .

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΥΗΜΕΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΝΕΚΡΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (GLOBAL WELFARE & DEADWEIGHT LOSS)

Παγκόσμια Ευημερία Και Απόλεια Νεκρού Σημείου ή *Global Welfare* είναι το άθροισμα του πλεονάσματος καταναλωτών και του κέρδους των παραγωγών. Η *Global Welfare* έχει όλα τα κέρδη της εμπορίας. Η παγκόσμια ευημερία είναι μέγιστη όταν μια ανταγωνιστική αγορά επιτρέπεται να λειτουργεί ελεύθερα, και η τιμή εγκαθίσταται στη διχοτόμηση της προσφοράς και της ζήτησης των καμπυλών. (Figure 2.15).

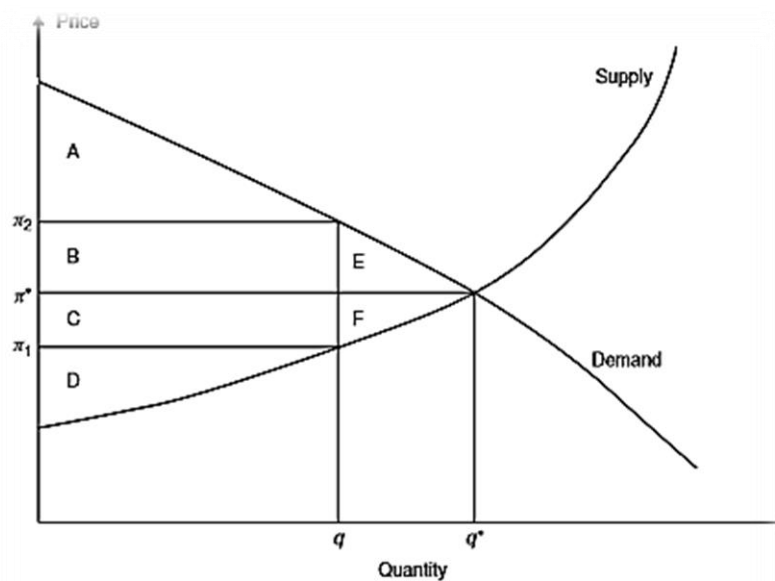


Figure 2.15 Global welfare and deadweight loss

ΕΣΟΔΑ- ΕΞΟΔΑ

Μια επιχείρηση παράγει y (ποσότητα). Το y (μόνο αγαθό), για να το παράγει η επιχείρηση χρειάζεται κάποια ενέργεια (κεφάλαιο) συντελεστές παραγωγής. Εξαρτώνται από τον τύπο της παραγωγής, δηλαδή από τις πρώτες ύλες, labor (κόπος), τη γη, τα κτήρια ή τις μηχανές. Η δικιά μας επιχείρηση χρειάζεται μόνο δύο συντελεστές παραγωγής. Η παραγωγή σχετίζεται με την ενέργεια με συνάρτηση παραγωγής: $y=f(x_1,x_2)$

y = παραχθέν αγαθό, x_1 = λίπασμα, x_2 = χωράφι= σταθερό

Όσο x_1 (λίπασμα) αυξάνεται, αυξάνεται και το y (παραχθέν αγαθό) .

Ο βαθμός αύξησης της y μειώνεται όσο το x_1 μεγαλώνει. Αυτό ονομάζεται νόμος του φθίνοντος οριακού προϊόντος.

- **Input- Output:** υποδηλώνει πόσο απαιτείται να παραχθεί από το μεταβλητό συντελεστή παραγωγής 1 καθορισμένο ποσό αγαθών.

- **Παράδειγμα:** θερμοηλεκτρικός σταθμός πόσα καύσιμα χρειάζονται την ώρα για την παραγωγή ενός ποσού:

$$c_{SR}(y) = w_1 * x_1 + w_2 * \bar{x}_2 = w_1 * g(y) + w_2 * \bar{x}_2$$

w_1, w_2 : τιμές των παραγόντων x_1, x_2 (Figure 2.17)

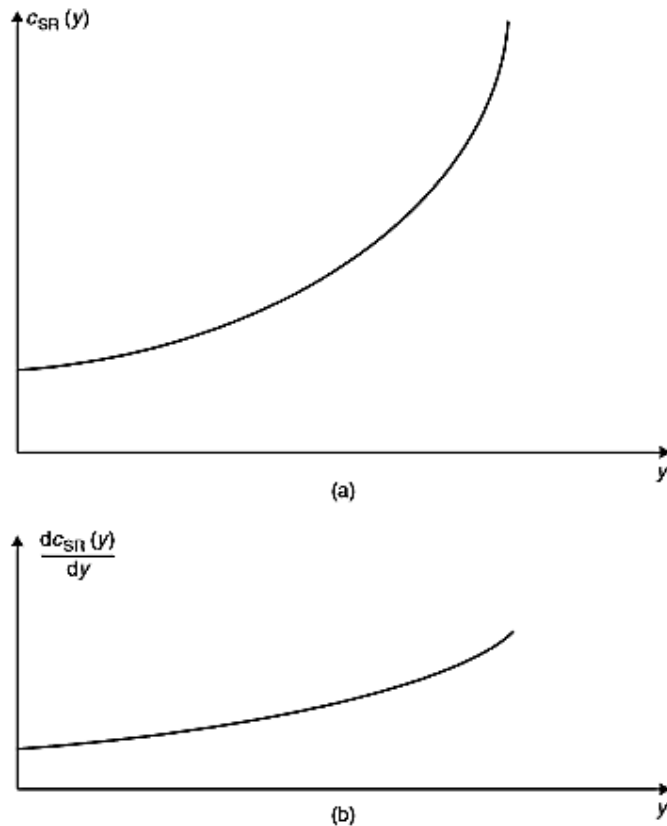


Figure 2.17 (a) Typical short-run cost function and (b) corresponding short-run marginal cost function

ΤΥΠΟΙ ΑΓΟΡΩΝ

Αν κάποιες συναλλαγές πρέπει να γίνουν γρήγορα και εύκολα, η αγορά πρέπει να είναι “liquid” (ρευστή). Στη ρευστή αγορά πρέπει να υπάρχουν συμμετέχοντες που να μπορούν να αγοράζουν ή να πουλούν αγαθά. Ο μηχανισμός που καθορίζει την τιμή της αγοράς πρέπει να είναι αξιόπιστος.

ΑΓΟΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ (SPOT MARKET)

Στην *Spot Market Αγορά Άμεσης Παράδοσης*, ο Πωλητής διανέμει άμεσα τα αγαθά και ο Αγοραστής πληρώνει επί τόπου (*on the spot*), δηλαδή δεν μπορεί κάποιο πρόσωπο να κάνει πίσω στη συμφωνία.

Αυτή η αγορά έχει το πλεονέκτημα της αμεσότητας, σαν καταναλωτής αγοράζω την ποσότητα που χρειάζομαι. Δυστυχώς σε αυτό τον τύπο της αγοράς οι τιμές τείνουν να αλλάζουν γρήγορα. Μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης ή μείωση της παραγωγής, επιφέρει μία ύψωση της τιμής. Παρομοίως, μία βουτιά στην παραγωγή χαμηλώνει την τιμή.

ΠΡΟΘΕΣΜΙΑΚΕΣ ΑΓΟΡΕΣ

Αν κάποιοι πωλητές ενδιαφέρονται για την εμπορευματοποίηση ενός αγαθού (π.χ. σιτάρι) για τη διανομή, αναπτύσσεται μια προθεσμιακή αγορά. Η ίδρυση μιας τέτοιας αγοράς δίνει την πρόσβαση στις ομάδες για την εμπορία εταιρών και βοηθειών, και αποφασίζουν αν οι τιμές που δίνονται είναι λογικές.

ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ (FUTURE MARKETS)

Στην *δευτερογενή αγορά* οι παραγωγοί ή οι καταναλωτές του εμπορεύματος μπορούν να πουλήσουν ή να αγοράσουν τις *τιτλοδοτημένες προθεσμιακές συμβάσεις*, που βοηθάει τις ομάδες να διαχειρίζονται τις διακυμάνσεις στην Άμεση Τιμή. Η συμμετοχή σε αυτή την αγορά δεν είναι περιορισμένη στις επιχειρήσεις που παράγουν ή να καταναλώνουν το εμπόρευμα.

ΣΥΜΒΟΛΑΙΑ

1) ΠΡΟΘΕΣΜΙΑΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑΙΑ & ΠΡΟΘΕΣΜΙΑΚΕΣ ΑΓΟΡΕΣ

Ένα προθεσμιακό συμβόλαιο:

- i. ποσότητα και την ποιότητα του προϊόντος (π.χ. σιταριού) που διανέμεται.
- ii. Ημερομηνία παράδοσης
- iii. Ημερομηνία πληρωμής της παράδοσης
- iv. Οι κυρώσεις αν η ομάδα αποτύχει στην τιμή δέσμευσης
- v. Η τιμή που θα πληρωθεί

Αν η *Άμεση Τιμή* είναι *μεγαλύτερη* από τη συμφωνηθείσα τιμή τότε έχουμε *ζημία* για τον *πωλητή* και *κέρδος* για τον *αγοραστή*.

Αν η *Άμεση Τιμή* είναι *μικρότερη* από τη συμφωνηθείσα τιμή τότε έχουμε *ζημία* για τον *αγοραστή* και *κέρδος* για τον *πωλητή*.

2) FUTURE CONTRACTS (ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ) & FUTURE MARKETS (ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΓΟΡΕΣ)

Τα *Future contracts* (*Μελλοντικές Συμβάσεις*) τις χρησιμοποιούν κερδοσκόποι που θέλουν να αγοράσουν ένα συμβόλαιο για παράδοση εμπορεύματος σε μια μέλλουσα ημερομηνία, υπό την *προϋπόθεση* να το πουλήσουν σε *υψηλότερη* τιμή. Ένας κερδοσκόπος πουλάει το συμβόλαιο πρώτα ελπίζοντας να αγοράσει ένα σε *χαμηλότερη* τιμή.

3) ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΣΥΜΒΟΛΑΙΩΝ

Αν ο πωλητής δεν έχει τη συμφωνηθείσα προς παράδοση ποσότητα του εμπορεύματος, πρέπει να αγοράσει το έλλειμμα από την Αγορά Άμεσης Παράδοσης. Αν ο αγοραστής δεν μπορεί να λάβει πλήρη τη διανομή, πρέπει να πουλήσει την υπέρβαση στην αγορά άμεσης παράδοσης.

Συμβόλαια Επιλογής (calls and puts) *παράδοση* υπό όρους ασκούνται μόνο όταν ο κατέχων του συμβολαίου αποφασίσει να το πράξει.

4) CONTRACTS FOR DIFFERENCE (ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ)

Οι παραγωγοί & οι καταναλωτές εμπορευμάτων υποχρεούνται να εμπορεύονται μέσω μιας κεντρικής αγοράς. Αφού δεν αφήνονται να μπου σε διμερείς συμφωνίες & δεν μπορούν να επιλέξουν σε συμβόλαια επιλογής, *future or forward* για τη μείωση της έκθεσής τους σε κινδύνους καταλήγουν σε *Συμβάσεις Για Διαφορές* (*contracts of difference*).

Συμβάσεις Για Διαφορές (*Contracts Of Difference*): λειτουργούν παράλληλα με την κεντρική αγορά. Οι ομάδες διαλέγουν ανάμεσα σε *ποσότητα εμπορεύματος* (strike price & amount commodity).

1.2: ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στις περισσότερες χώρες η πιθανότητα να μεταφέρουμε την ηλεκτρική ενέργεια, όπου όλες οι γεννήτριες και τα φορτία είναι συνδεδεμένα στον ίδιο ζυγό, δεν είναι υποστηρίξιμη.

ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Για την πραγματοποίηση των συναλλαγών της ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζονται ο αγοραστής και ο πωλητής. Η αγορά και η πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας τελούνται για την εξισορρόπηση της γεννήτριας. Έτσι, περιορίζεται το ποσό που οι γεννήτριες εγχέουν.

ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Με το καινούργιο λογισμικό ανάλυσης ισχύος του συστήματος, υπολογίζονται ανασφαλώς αριθμητικά οι συναλλαγές, υποστηρίζοντας ότι θα φτιάξουν τη διαχείριση του συστήματος.

Οι διοικητικές διαδικασίες μπορούν να δημιουργηθούν για την υποστήριξη της παραγγελίας, όπου οι συναλλαγές θα γίνουν περικοπές. Λαμβάνουμε υπόψη τη φύση των συναλλαγών πάγιες και μη πάγιες και την παραγγελία που δηλώθηκαν από το διαχειριστή του συστήματος και τους ιστορικούς παράγοντες. Επίσης, δεν υπολογίζουμε τα οικονομικά οφέλη από ποικίλες συναλλαγές, γιατί η αποκεντρωμένη διαπραγμάτευση του περιβάλλοντος δεν δίνει πλαίσιο για την εκτίμηση των οφελών. Οι εισαγγελείς από την αποκεντρωμένη ηλεκτρική διαπραγμάτευση υποστηρίζουν ότι τα εργοστάσια, σκεφτόμενα τις συναλλαγές της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι καλύτερα τοποθετημένα στο πάρσιμο της απόφασης εάν θέλουν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο μεταφοράς.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Το παράδειγμα μας παρουσιάζει τα φυσικά δικαιώματα μεταφοράς απλούστερα από ότι στην πραγματικότητα. Η πρώτη δυσκολία είναι πρακτική και υψηλή, γιατί η διακλάδωση όπου η ενέργεια περνάει στο δίκτυο υποστηρίζεται από τους φυσικούς νόμους, και όχι από τις επιθυμίες των καταναλωτών. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι τα φυσικά δικαιώματα μεταφοράς επηρεάζουν την επιδείνωση της άσκησης της δύναμης της αγοράς από τους καταναλωτές.

ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ

ΔΥΟ ΘΕΜΕΛΕΙΩΔΕΙΣ ΝΟΜΟΙ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (KIRCHOFF)

KCL (CURRENT- ΡΕΥΜΑΤΩΝ)

Ο Νόμος των Ρευμάτων αποδεικνύει ότι το Άθροισμα Των Ρευμάτων που εισέρχονται σε ένα κύκλωμα ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων που εξέρχονται από αυτό.

KVL (VOLTAGE-ΤΑΣΕΩΝ)

Ο Νόμος των Τάσεων δείχνει ότι σε όλες τις διακλαδώσεις πρέπει να είναι ίσο με το μηδέν, ή οι τάσεις στη διάρκεια των παραλλήλων διακλαδώσεων να είναι ανάλογες.

$$V_{12} = Z_A * I_A = Z_B * I_B$$

Όπου Z_A, Z_B αντιστάσεις.

Έχουμε:

$$\bar{I} = I_A + I_B$$

$$I_A = \frac{z_B}{z_A + z_B} I \quad (6.1)$$

$$I_B = \frac{z_A}{z_A + z_B} I \quad (6.2)$$

Το ρεύμα στις παράλληλες διακλαδώσεις ξεχωρίζει σαν ποσοστό αντίστασης από κάθε διακλάδωση. Η αντίσταση από κάθε από κάθε διακλάδωση είναι μικρότερη από την αντίστασή του.

$$z = R + jX \quad (6.3)$$

Η ενεργός δύναμη στις παράλληλες διακλαδώσεις δίνεται από τις σχέσεις (6.4) και (6.5). Οι παράγοντες που σχετίζονται με την ενεργό δύναμη και τη ροή της διακλάδωσης λέγονται *Παράγοντες Μεταφοράς Και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας ή Power Transfer Distribution Factors (PTDF)*.

$$F^A = \frac{x_B}{x_A + x_B} P \quad (6.4)$$

$$F^B = \frac{x_A}{x_A + x_B} P \quad (6.5)$$

ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ, ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΙΣΧΥΟΣ

Τα *Δικαιώματα Μεταφοράς* μεταβιβάζονται αφήνοντας τον *ιδιοκτήτη* να μεταφέρει ένα *συγκεκριμένο ποσό* ηλεκτρικής ενέργειας σε *συγκεκριμένη χρονική στιγμή*. Αν τα *Δικαιώματα Μεταφοράς* δημιουργούνται όπως όλα τα περιουσιακά δικαιώματα, οι *ιδιοκτήτες* μπορούν να τα *χρησιμοποιήσουν* ή να τα *πουλήσουν*, μπορούν να τα *κρατήσουν* και να *μην τα πουλήσουν*. Σε μία *τέλεια ανταγωνιστική αγορά*, αγοράζοντας και μη χρησιμοποιώντας τέτοια δικαιώματα είναι *λάθος απόφαση*. Από την άλλη, σε μία λιγότερο τέλεια ανταγωνιστική αγορά, τα φυσικά δικαιώματα μεταφοράς επαυξάνουν την ευκαιρία των μετόχων να μεταχειρίζονται την δύναμη της αγοράς.

ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Οι *παραγωγοί* και οι *πελάτες* υποβάλλουν τις *προσφορές* στο διαχειριστή του συστήματος. Ο διαχειριστής του συστήματος, που εξαρτάται από όλα τα εργοστάσια, επιλέγει τις *βέλτιστες προσφορές* και τις *προτάσεις*, καθώς τηρούνται οι *περιορισμοί ασφαλείας* που επιβάλλονται από το δίκτυο μεταφοράς. Σαν μέρος αυτής της διαδικασίας, ο διαχειριστής του συστήματος υποστηρίζει τις τιμές εκκαθάρισης της αγοράς. Όταν λαμβάνονται υπόψη οι *απώλειες* ή η *μετάδοση* της *κυκλοφοριακής συμφόρησης*, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από το σύστημα ζυγού στο οποίο *εγχέται* ή *εξάγεται*. Η τιμή που *πληρώνουν* οι *καταναλωτές* ή που *πληρώνονται παραγωγοί* είναι *ίδια* για *όλους* τους μετόχους που είναι *συνδεδεμένοι* για τον ίδιο ζυγό. Αυτή η περίπτωση είναι σε ένα *αποκεντρωμένο εμπορικό σύστημα*, στο οποίο οι τιμές υποστηρίζονται στο *διμερές μοντέλο*. Η *οικονομική αποδοτικότητα* επιτυγχάνεται μόνο αν *βελτιστοποιεί* τη χρήση του δικτύου μεταφοράς.

ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΖΥΓΩΝ

Η *ανάλυση* αρχίζει από τις επιπτώσεις του δικτύου μεταφοράς στο *εμπόρευμα ηλεκτρικής ενέργειας* χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα *δύο χώρες*. Μετά από χρόνια οι χώρες αυτές αποφάσισαν για *οικονομική συνεργασία*. Μια πρόταση για τη συνεργασία αυτή είναι η *επανασύνδεση του εθνικού δικτύου* της ηλεκτρικής ενέργειας. Προτού επιτευχθεί η συνεργασία αυτή ζητήθηκε από ένα οικονομολόγο να μελετήσει τις επιπτώσεις αυτής της σύνδεση στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και τη μελέτη των *πλεονεκτημάτων* που θα αποκτήσουν οι χώρες μετά τη σύνδεση αυτή.

Η ανάλυση ξεκινάει από τα δύο εθνικά δίκτυα. Ο οικονομολόγος παρατηρεί ότι οι χώρες ανέπτυξαν τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και είναι λίγο ανταγωνιστικές. Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε αγορά επηρεάζει το οριακό κόστος της παραγωγής. Η ικανότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας των δύο χωρών υπερβαίνει τη ζήτηση από ένα σημαντικό περιθώριο. Με τη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης ο οικονομολόγος εκτιμάει τη συνάρτηση προμήθειας για την ηλεκτρική αγορά κάθε χώρας.

Η Χώρα 1:

$$\pi_B = MC_B = 10 + 0.01P_B [\text{€/MWh}] \quad (6.6)$$

Η Χώρα 2:

$$\pi_S = MC_S = 13 + 0.02P_S [\text{€/MWh}] \quad (6.7)$$

Η παρακάτω συνάρτηση (Figure 6.7) αυξάνεται μονοτονικά, όπως όλες οι γραφικές των προμηθειών, με τη ζήτηση για την ηλεκτρική ενέργεια.

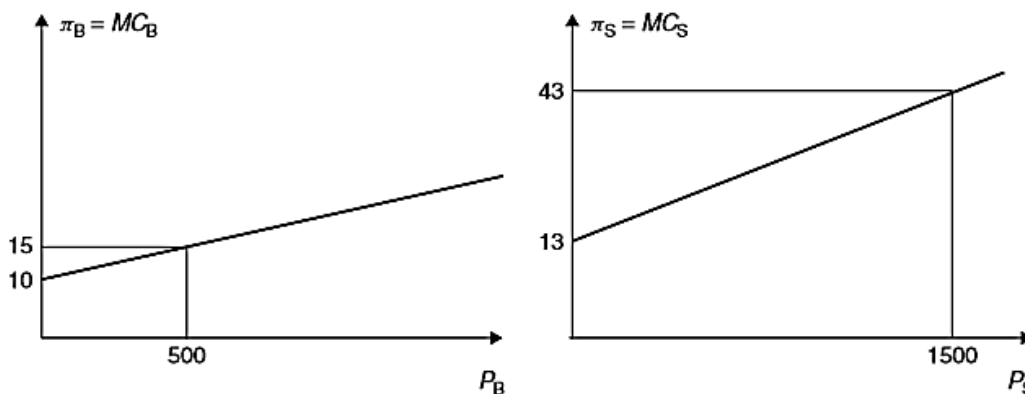


Figure 6.7 Supply functions for the electrical energy markets of Borduria and Syldavia

Επίσης ο οικονομολόγος υπολογίζει και τη ζήτηση των Χωρών 1,2 που είναι σταθερές 500 MW, 1500MW αντίστοιχα. Επιπλέον, διαπιστώνει ότι αυτές οι ζητήσεις έχουν τιμές ελαστικότητας μηδέν. Άρα, όταν οι αγορές ηλεκτρικής αυτών των χωρών συνεργαστούν, οι τιμές θα είναι οι εξής:

$$\pi_B = MC_B = 10 + 0.01 * 500 = 15 [\text{€/MWh}]$$

$$\pi_S = MC_S = 13 + 0.02 * 1500 = 43 [\text{€/MWh}]$$

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Σε κανονικές συνθήκες η σύνδεση μπορεί να μεταφέρει 1600MW. Αν όλοι οι παραγωγοί της Χώρας 2 προγραμματίζουν να κλείσουν (shut down) θα μπορούσε να προμηθευτεί φορτίο από τη Χώρα 1 μέσω της διασύνδεσης. Η ικανότητα αυτής της σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη που θα μπορούσε ενδεχομένως να διαβιβαστεί.

Οι σχέσεις (6.8) και (6.9) δείχνουν ότι οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας στη Χώρα 1 είναι χαμηλότερες από της Χώρας 1. Οι παραγωγοί της Χώρας 1 μπορούν να παρέχουν όχι μόνο την εγχώρια ζήτηση, αλλά και το σύνολο της ζήτησης της Χώρας 2. Έτσι έχουμε:

$$P_B = 2000MW \quad (6.10)$$

$$P_S = 0 \text{ MW} \quad (6.11)$$

Κάνοντας αντικατάσταση στις (6.6) και (6.7) προκύπτει:

$$MC_B = 30 \$/\text{MWh} \quad (6.12)$$

$$MC_S = 13 \$/\text{MWh} \quad (6.13)$$

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Στη διάρκεια ενός χρόνου, έχουν βγει εκτός του συστήματος συντήρησης περιεχόμενα του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα περιεχόμενα αυτά δεν περιέχουν μόνο τις γραμμές και τους μετασχηματιστές, αλλά μονάδες παραγωγής που προσφέρουν υποστήριξη στη συντήρηση. Η σύνδεση της Χώρας 1 και της Χώρας 2 δεν μπορεί να μεταφέρει την ισχύ των 1600MW. Ο οικονομολόγος υπολογίζει ότι η σύνδεση μπορεί να μεταφέρει τη μέγιστη τιμή των 400MW.

Η παραγωγή της Χώρας 1 πρέπει να μειωθεί κατά 900MW (500MW για το τοπικό ρεύμα και 400MW πωλείται στη Χώρα 2). Η παραγωγή της Χώρας 2 είναι 1100MW, από την (6.6) και (6.7):

Η Χώρα 1:

$$\pi_B = MC_B = 10 + 0.01P_B = 10 + 0.1 * 900 = 19 [€/MWh]$$

Η Χώρα 2:

$$\pi_S = MC_S = 13 + 0.02P_S = 13 + 0.02 * 1100 = 35 [€/MWh]$$

ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Ο οικονομολόγος καταλήγει στην ποσοτικοποίηση του αποτελέσματος που η συμφόρηση στη σύνδεση θα έχουν τους προμηθευτές και τους καταναλωτές. Υπολογίζουμε τις τιμές στις Χώρες 1 και 2 συναρτήσει της ηλεκτρικής ενέργειας στη σύνδεση:

Η Χώρα 1:

$$\pi_B = MC_B = 10 + 0.01 * (D_B + F_{BS}) \quad (6.22)$$

Η Χώρα 2:

$$\pi_S = MC_S = 13 + 0.02 * (D_S - F_{BS}) \quad (6.23)$$

Η συνολική πληρωμή των καταναλωτών για την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργειά τους δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E_{total} = \pi_B * D_B + \pi_S * D_S \quad (6.24)$$

Η Figure 6.11 δείχνει την ποικιλία των πληρωμών συναρτήσει του F_{BS} . Αυτή η πληρωμή αυξάνεται μονοτονικά καθώς η ροή μεταξύ των δύο χωρών αυξάνεται.

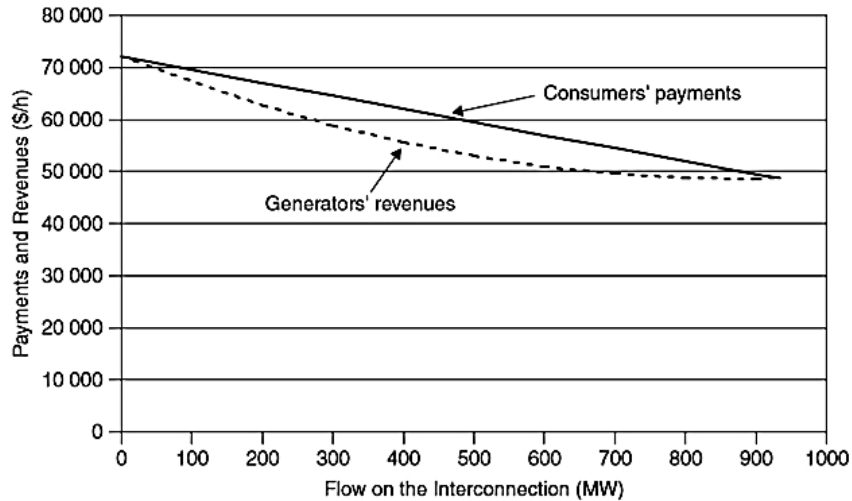


Figure 6.11 Consumers' payments (solid line) and generators' revenue (dashed line) as a function of the flow on the interconnection between Borduria and Syldavia

Η συνολική πρόσδοδος που συλλέχθηκε από τις μονάδες παραγωγής από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας και στις δύο αγορές, δίνεται από:

$$R_{TOTAL} = \pi_B * P_B + \pi_S * P_S = \pi_B * (D_B + F_{BS}) + \pi_S * (D_S - F_{BS}) \quad (6.25)$$

ΚΟΜΒΙΚΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

Οι κομβικές τιμές στους ζυγούς χωρίς οριακές τιμές μπορούν να είναι υψηλότερες, χαμηλότερες ή ανάμεσα στις τιμές των ζυγών με οριακή παραγωγή. Μια κομβική τιμή μπορεί να είναι αρνητική. Επίσης, έχουμε δείξει ότι τα διαφορετικά εμπορεύματα, όπως η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να ρέει από την υψηλή στη χαμηλή τιμή. Όλες αυτές οι επιρροές είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης της οικονομίας και των KVL.

Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να είναι αντίθετα της κοινής αίσθησης, αλλά να είναι σωστά μαθηματικά. Έτσι, εμπορευόμαστε την ηλεκτρική ενέργεια από ένα κερδοσκοπικό σύστημα, που γεφυρώνει το πιθανό δίκτυο μεταφοράς και απαιτεί τη χρήση των κομβικών οριακών τιμών. Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη βελτιστοποίηση που μεγιστοποιεί παγκόσμια ευημερία. Το σύστημα αυτό, λειτουργεί με έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

1.3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΟΣ ΒΑΡΕΛΙΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΜΙΑ ΚΙΛΟΒΑΤΤΩΡΑ

Η ανάπτυξη της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στην προϋπόθεση ότι μπορεί να θεωρηθεί σαν *εμπόρευμα*. Υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στην *ηλεκτρική ενέργεια* και σε άλλα *εμπορεύματα*, όπως τα μπουζέλ σιταριού, βαρέλια πετρελαίου ή κυβικά μέτρα αερίου, και επηρεάζουν την *οργάνωση* και τους *κανόνες* της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βασικότερη διαφορά είναι ότι η *ηλεκτρική ενέργεια* είναι συνδεδεμένη με το *φυσικό σύστημα* που οι συναρτήσεις *ταιριάζουν γρηγορότερα* από σε κάθε άλλη αγορά. Σε αυτό το σύστημα ενέργειας προμήθειας και ζήτησης – παραγωγής και φορτίου- πρέπει να ισορροπείται σχετικά με την ανά δευτερόλεπτο βάση. Αν η *ισορροπία* αυτή *δεν διατηρείται* το σύστημα *καταρρέει με καταστροφικές συνέπειες*. Μια τέτοια διακοπή είναι ανυπόφορη, γιατί *δεν σταματάει* τη λειτουργία του *τοπικού συστήματος μεταφοράς*, αλλά μπορεί να μείνει μια ολόκληρη περιοχή ή ολόκληρη χώρα χωρίς ενέργεια για αρκετές ώρες. Οι κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες από μια *διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος* (blackout) του συστήματος είναι τόσο αυστηρές, που καμία κυβέρνηση θα συμφωνούσε στην εκτέλεση του μηχανισμού της αγοράς που αυξάνει την πιθανότητα ενός τέτοιου γεγονότος. Ισορροπώντας την *προμήθεια* και τη *ζήτηση* για την ηλεκτρική ενέργεια στην *Βραχυχρόνια Περίοδο Διόρθωσης Παραγόντων Της Παραγωγής* είναι μια διαδικασία που πρέπει να μην αφεθεί σε μια σχετικά βραδυκίνητη και ανεξήγητη οντότητα σαν την αγορά. Στη βραχυχρόνια περίοδο διόρθωσης παραγόντων της παραγωγής η ισορροπία μπορεί να διατηρηθεί σε οποιοδήποτε κόστος, διαμέσου του μηχανισμού, ο οποίος δεν βασίζεται στην αγορά για να διαλέξει πόρους επιστολής.

Μια σημαντική *διαφορά* ανάμεσα στην *ηλεκτρική ενέργεια* και σε άλλα *εμπορεύματα* είναι ότι η *ενέργεια* που παράγεται από ένα παραγωγό *δεν μπορεί να κατευθυνθεί προς ένα συγκεκριμένο καταναλωτή*, δηλαδή ο καταναλωτής δεν μπορεί να προμηθευτεί ενέργεια από ένα παραγωγό. Αντίθετα η ενέργεια που παράγεται από όλες τις γεννήτριες συγκεντρώνεται στο δρόμο του φορτίου. Η *συγκέντρωση* είναι επιθυμητή γιατί οδηγεί σε πολύτιμες κλίμακες της οικονομίας, η μέγιστη χωρητικότητα παραγωγής πρέπει να είναι ανάλογη με τη *μέγιστη συγκεντρωτική ζήτηση* και όχι με το *άθροισμα της μεμονωμένης μέγιστης ζήτησης*. Από την άλλη μια κατάρρευση του συστήματος στην οποία το εμπόρευμα συγκεντρώνεται επηρεάζει τον καθένα, και όχι μόνο στα μέρη συγκεκριμένης συναλλαγής.

Τελικά, η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας επιδεικνύεται αναμενόμενη σε καθημερινές και εβδομαδιαίες κυκλικές μεταβολές. Παρόλα αυτά δεν σημαίνει ότι το εμπόρευμα είναι το μοναδικό που η ζήτησή του είναι κυκλική. Για παράδειγμα, ο καφές επιδεικνύεται 2 ή 3 φορές την ημέρα, που χωρίζεται σε περιόδους με χαμηλότερη ζήτηση. Η εμπορεία του καφέ δεν απαιτεί ειδικούς μηχανισμούς γιατί οι καταναλωτές μπορούν εύκολα να το αποθηκεύσουν σε υγρή ή στερεή μορφή. Από την άλλη η *ηλεκτρική ενέργεια* πρέπει να *παράγεται* την *ίδια ώρα* που *καταναλώνεται*. Στη βραχυχρόνια περίοδο διόρθωσης παραγόντων της παραγωγής η *ελαστικότητα της ζήτησης* είναι *πολύ μικρή*, αντιστοιχίζοντας την προμήθεια και τη ζήτηση απαιτείται οι *εγκαταστάσεις* παραγωγής να είναι ικανές να παρακολουθήσουν τις μεγάλες και ραγδαίες αλλαγές στην κατανάλωση που γίνονται σε μια μέρα. Δεν παράγουν όλες οι μονάδες παραγωγής ενεργοποιημένες στη διάρκεια της ημέρας. Όταν η *ζήτηση* είναι *χαμηλή* οι πιο *αποτελεσματικές* μονάδες θα είναι *ανταγωνιστικές* και οι άλλες θα σβήνουν προσωρινά. Αυτές οι *λιγότερο αποτελεσματικές* μονάδες χρειάζονται μόνο για τις *ώρες αιχμής*. Ο *οριακός παραγωγός* αλλάζει όταν το *φορτίο αυξάνεται* και *μειώνεται* πρέπει να περιμένουμε η τιμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας να διακυμαίνεται. Είναι ασυνήθιστες οι ραγδαίες κυκλικές διακυμάνσεις του κόστους και της τιμής του εμπορεύματος.

Η εμπορεία του φυσικού αερίου λαμβάνει μέρος στο φυσικό δίκτυο στο οποίο το εμπόρευμα συγκεντρώνεται και η ζήτηση είναι κυκλική. Παρόλα αυτά τα αποθέματα της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται στους χώρους του φυσικού αερίου είναι μεγαλύτερη από τα αποθέματα της κινητικής ενέργειας που αποθηκεύεται στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανισορροπία ανάμεσα στην

παραγωγή και στην κατανάλωση του φυσικού αερίου θα μπορούσε να έχει τελειώσει πολύ πριν γίνει κατάρρευση του δικτύου.

Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΜΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ

Η αγορά είναι ένα μέρος όπου γίνονται *συναλλαγές*. Οι συναλλαγές μπορούν να οδηγήσουν σε ένα σημείο *ισορροπίας* στο οποίο η τιμή ξεκαθαρίζει, δηλαδή η *προμήθεια* είναι *ανάλογη* της *ζήτησης*. Αν η ηλεκτρική ενέργεια πρόκειται να πουληθεί σύμφωνα με την ιδέα της Ελεύθερης Αγοράς, η ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας θα έπρεπε να έχει τεθεί στην αλληλεπίδραση των καταναλωτών και των πωλητών.

Σε αυτή την ιδανική αγορά, οι *μεγάλοι καταναλωτές* και οι *έμποροι λιανικής* πρέπει να αγοράσουν την ηλεκτρική ενέργεια από *εταιρείες παραγωγής*, και πρέπει να υπολογίσουν πόσο θα αγοράσουν την ενέργεια. Στο τέλος, προβλέπεται η κατανάλωσή τους ή η κατανάλωση των δικών τους καταναλωτών για κάθε περίοδο της αγοράς (ώρα, μισή ώρα ή δεκαπέντε λεπτά) πριν μπουν στα συμβόλαια. Οι *παραγωγοί προγραμματίζουν* την παραγωγή των μονάδων τους για να μεταφέρεται η ενέργεια το χρόνο που συμφωνήθηκε, και προσπαθούν ξεκάθαρα να *ελαχιστοποιήσουν το κόστος παραγωγής*. Κανένα μέρος δεν μπορεί να συναντήσει τις συμβαλλόμενες υποχρεώσεις του με ακρίβεια. Πρώτον, η ζήτηση των καταναλωτών δεν είναι ανάλογη με την προβλεπόμενη τιμή. Δεύτερον, τα απρόβλεπτα προβλήματα εμποδίζουν την παραγωγή των μονάδων από τη μεταφορά των συμφωνηθέντων ποσών ενέργειας. Μια *ξαφνική ηλεκτρική ή μηχανική διακοπή* μπορεί να εμποδίσει τη μονάδα να σβήσει ή να ελαττώσει την εξαγωγή της από το σύστημα.

Τα λάθη αυτά και τα απρόβλεπτα γεγονότα παρουσιάζουν κενά ανάμεσα στην παραγωγή και στο φορτίο, που *γεφυρώνουν* γρήγορα και *συντηρούν* την *ακεραιότητα* του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αν αυτά τα κενά ανάμεσα στην *παραγωγή* και το *φορτίο* επρόκειτο να αντιμετωπιστούν ως *ανισορροπίες* ανάμεσα στην προμήθεια και τη ζήτηση, και πρόκειται να *διορθωθούν* χρησιμοποιώντας ένα *μηχανισμό ανοιχτής αγοράς*, οι παραγωγοί και οι καταναλωτές θα έπρεπε να μένουν *ενημερωμένοι* για την κατάσταση της αγοράς (προσφορά, ζήτηση, τιμές) στη *δεύτερη ανά δευτερόλεπτο (second-by-second) βάση*. Ένα επαρκώς μεγάλο νούμερο από αυτά θα μπορούσε να προσαρμόζεται σε αυτό το χρονοδιάγραμμα. Οι παραγωγοί και οι καταναλωτές πρέπει να προσαρμόζουν την παραγωγή και την κατανάλωσή τους σε οποιοδήποτε χρόνο και σε σύντομο χρονικό διάστημα για την απορρόφηση οποιασδήποτε αξιόπιστης ανισορροπίας. Στην τωρινή κατάσταση της τεχνολογίας είναι δύσκολο να κατανέμουμε ένα σύστημα που είναι ικανό να εκπέμπει τεράστιες ποσότητες δεδομένων και καταγραφής των χιλιάδων συναλλαγών μπλέκονται. Ακόμα και αν μια πληροφορία υποδομής θα μπορούσε να τεθεί σε εφαρμογή, παραμένει υπό απόδειξη ότι ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε επαρκώς γρήγορα και αξιόπιστα να εμποδίσει τις ανισορροπίες που πιθανόν οδηγήσουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, τα κόστη που σχετίζονται με ένα τέτοιο σύστημα, θα είναι απαγορευτικά.

Συμπεραίνουμε ότι καθώς ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας είναι *διαπραγματεύσιμο μέσω ανοιχτών αγορών*, μια τέτοια αγορά είναι *ανίκανη* να *συντηρήσει* την *αξιοπιστία* του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η υπεύθυνη για τη διαχείριση της Αγοράς Άμεσης Παράδοσης παραχωρεί ένα μηχανισμό για την εξισορρόπηση του φορτίου και της παραγωγής, πρέπει να υπεισέρχεται η ανοιχτή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όσο ο χρόνος μεταφοράς πλησιάζει. Η συνάρτηση του χρόνου μεταφοράς είναι για να αντιστοιχήσει το υπόλοιπο του φορτίου και της παραγωγής προσαρμόζοντας την παραγωγή από τις ευέλικτες γεννήτριες και περιορίζοντας τη ζήτηση των προθύμων καταναλωτών. Οι καταναλωτές πρέπει να ανταποκρίνονται στις σημαντικές διαταραχές που έγιναν από ξαφνική και απρόοπτη αποσύνδεση από μεγάλες μονάδες παραγωγής λόγω αναπόφευκτων τεχνικών προβλημάτων. Αν και η ανάγκη της διαχείρισης της Αγοράς Άμεσης Παράδοσης πηγάζει από τις τεχνικές σκέψεις, αυτή η αγορά άμεσης παράδοσης πρέπει να λειτουργήσει με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Όντας έξω από ισορροπία, μπορεί να ήταν αναπόφευκτο

για τους παραγωγούς και τους καταναλωτές, αλλά δεν θα ήταν χωρίς κόστος. Για την ενθάρρυνση της αποδοτικής συμπεριφοράς, οι παραγωγοί και οι καταναλωτές πρέπει να πληρώσουν το *πραγματικό κόστος* της ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή αγοράζεται και πωλείται στην αγορά άμεσης παράδοσης, για να επαναφέρει την ισορροπία ανάμεσα στο φορτίο και στην παραγωγή.

ΑΝΟΙΧΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΑΓΟΡΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΜΕΡΕΙΣ ΣΥΝΑΛΛΑΓΕΣ

Οι *Διμερείς Συναλλαγές* αποτελούνται από δύο μέρη τον *αγοραστή* και τον *πωλητή*. Οι *συμμετέχοντες* έχουν εισέλθει στα συμβόλαια *χωρίς περιπλοκή, παρεμβολές ή διευκόλυνση* από τρίτο μέρος. Ανάλογα με τον *εύκαιρο χρόνο* και τις *διαπραγματεύσιμες ποσότητες* οι αγοραστές και οι πωλητές καταφεύγουν σε διαφορετικές φόρμες από διμερείς συναλλαγές.

Προσαρμοσμένα Μακροπρόθεσμα Συμβόλαια

Οι όροι αυτών των συμβολαίων είναι *ελαστικοί*, αφού διαπραγματεύονται *ιδιωτικά* να συναντήσουν τις ανάγκες και τους στόχους και από τα δύο μέρη. Συχνά εμπλέκουν την αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας (εκατοντάδων χιλιάδων MW) για μεγάλες περιόδους του χρόνου (μερικούς μήνες έως μερικά χρόνια). Τα μεγάλα κόστη συναλλαγών σχετίζονται με τη διαπραγμάτευση τέτοιων συμβολαίων να τα κάνουν αξιόπιστα μόνο όταν θέλουν να αγοράσουν ή να πουλήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας.

Συναλλαγές Πάνω Από τον Πάγκο

Σ' αυτές τις συναλλαγές εμπλέκονται μικρότερα ποσά ενέργειας που πρέπει να μεταφερθούν σύμφωνα με το πρότυπο προφίλ, δηλαδή ο τυποποιημένος ορισμός της ενέργειας που πρέπει να μεταφερθεί στις περιόδους της μέρας και της βδομάδας. Αυτή η φόρμα εμπορίας έχει *χαμηλότερο κόστος συναλλαγών* και χρησιμοποιείται από τους παραγωγούς και τους καταναλωτές για να ξεκαθαρίσουν τη θέση τους καθώς ο χρόνος προσέγγισης πλησιάζει.

Οι Συμμέτοχοι μπορούν να εισάγουν προτάσεις για να αγοράσουν ενέργεια και προσφορές τιμής και να πουλήσουν ενέργεια απευθείας σε μηχανογραφικό μέρος της αγοράς. Όλοι οι συμμετοχοί της αγοράς παρατηρούν τις *ποσότητες* και τις *τιμές* που υποβάλλονται, αλλά δεν ξέρουν την ταυτότητα του μέρους που υποβάλλεται κάθε προσφορά και κάθε πρόταση. Όταν ένα μέρος εισάγει μία προσφορά το λογισμικό που τρέχει τη συναλλαγή ελέγχει αν υπάρχει αντίστοιχη πρόταση για την περίοδο της διανομής της προσφοράς. Αν δεν βρέθηκε αντιστοίχιση η νέα προσφορά προστίθεται στη λίστα των αρίστων προσφορών και παραμένει εκεί μέχρι μία αντίστοιχη προσφορά είναι έτοιμη, ή αν η προσφορά είναι αποτραβηγμένη, ή αν παραγραφεί γιατί η αγορά θα κλείσει για αυτή την περίοδο. Αυτή η *μορφή συναλλαγών* είναι πολύ *γρήγορη* και *φθηνή*.

Τα *ουσιώδη χαρακτηριστικά* από αυτές τις τρεις φόρμες των *διμερών συναλλαγών* είναι ότι η *τιμή* από κάθε *συναλλαγή* έχει *τεθεί ανεξάρτητα από τα εμπλεκόμενα μέρη*. Δεν υπάρχει καμία επίσημη τιμή. Ενώ οι *τιμές* των διαπραγματεύσεων των *μακροπρόθεσμων συμβολαίων* είναι συχνά *κρατημένες ιδιωτικά, μερικές ανεξάρτητες αναφορικές υπηρεσίες* συχνά μαζεύουν πληροφορίες κατά τη διάρκεια της διαπραγμάτευσης του μετρητή και δημοσιεύουν την περίληψη των πληροφοριών για τις τιμές και τις ποσότητες σε μια μορφή που δεν αποκαλύπτει την ταυτότητα των μερών που εμπλέκονται. Αυτός ο τύπος της αγοράς αναφορά και απεικόνιση, της τελευταίας συναλλαγής κανονίζει μέσω της τελευταίας ηλεκτρονικής συναλλαγής την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της αγοράς δίνοντας σε όλους τους συμμετοχούς μια καθαρότερη ιδέα της κατάστασης και της κατεύθυνσης της αγοράς.

ΙΔΕΑΤΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην εμπορία της ηλεκτρικής ενέργειας, οι διμερείς συναλλαγές προβλέπονταν τόσο μεγάλες από την υπάρχουσα πρακτική. Από τότε που η ηλεκτρική ενέργεια συγκεντρώνεται όπως ρέει από τις γεννήτριες στα φορτία, έγινε αισθητό ότι η εμπορία γίνεται σε ένα κεντρικό επίπεδο και εμπλέκει όλους τους παραγωγούς και τους καταναλωτές. Έτσι, δημιουργήθηκαν ανταγωνιστικές οι *ιδεατές δεξαμενές ηλεκτρικής ενέργειας*. Στην πραγματικότητα *μερικές* ανταγωνιστικές ιδεατές δεξαμενές ηλεκτρικής ενέργειας, που ήταν *επί του παρόντος σε λειτουργία*, αναπτύχθηκαν στη βάση των *συνεργατικών συγκεντρώσεων* από το *μονοπώλιο* της χρησιμότητας των εταιριών με *παρακείμενα εδάφη υπηρεσίας*.

Αναπαύεται περισσότερο στις επαναλαμβανόμενες αλληλεπιδράσεις μεταξύ προμηθευτών και καταναλωτών, για να φτάσει την ισορροπία της αγοράς, η ιδεατή δεξαμενή δίνει ένα μηχανισμό για καθορισμό αυτής της ισορροπίας με συστηματικό τρόπο. Καθώς υπάρχουν πολλές πιθανές διακυμάνσεις μια συγκέντρωση λειτουργεί ως εξής:

- Οι εταιρίες παραγωγής υποβάλλουν *προφορές* για να προμηθεύσουν ένα συγκεκριμένο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε μια *συγκεκριμένη τιμή* για μια περίοδο υπό εξέταση και κατατάσσονται κατά *σειρά αυξανόμενης τιμής*. Από αυτή την κατάταξη η καμπύλη δείχνει την τιμή της προσφοράς σαν *συνάρτηση αθροιστικής προσφοράς*, η ποσότητα μπορεί να χτίζεται. Αυτή η καμπύλη κρίνεται για να γίνει η *προμηθευόμενη δύναμη της αγοράς*. Παρομοίως η καμπύλη *ζήτησης της αγοράς* μπορεί να δημιουργηθεί ρωτώντας τους καταναλωτές να υποβάλλουν προτάσεις καθορίζοντας την *ποσότητα και την τιμή* και κατατάσσοντας τις προσφορές σε *φθίνουσα σειρά τιμής*. Από τότε που η *ζήτηση* για την ηλεκτρολογία είναι *μη ελαστική* αυτό το βήμα παραλείπεται, η *ζήτηση* τίθεται σε μία τιμή αποφασισμένη να χρησιμοποιεί *μια πρόβλεψη φορτίου*. Με άλλα λόγια η *καμπύλη ζήτησης* φορτίου υπολογίζεται να είναι *κατακόρυφη* στην *τιμή πρόβλεψης του φορτίου*.
- Η διασταύρωση των κατασκευασμένων καμπυλών της *προμήθειας και της ζήτησης* αντιπροσωπεύει την *ισορροπία της αγοράς*. Όλες οι προμήθειες καταχωρούνται σε μία τιμή χαμηλότερη ή ανάλογη της εκκαθαριστικής τιμής της αγοράς γίνονται αποδεκτές, και οι γεννήτριες είναι διδαγμένες να παράγουν το ποσό ενέργειας που είναι αντίστοιχο με τις αποδεκτές προμήθειες. Παρομοίως όλες οι προσφορές καταχωρούνται σε μία τιμή καλύτερη ή ανάλογη της εκκαθαριστικής τιμής της αγοράς που είναι αποδεκτές, και οι καταναλωτές είναι πληροφορημένοι για το ποσό της ενέργειας που αφήνεται να ισορροπήσει το σύστημα.
- Η *εκκαθαριστική τιμή της αγοράς* απεικονίζει την τιμή από μια πρόσθετη *μεγαβατώρα (MWh)* της ηλεκτρικής ενέργειας και καλείται *οριακή τιμή του συστήματος*. Οι γεννήτριες πληρώνονται αυτή την οριακή τιμή του συστήματος για κάθε *μεγαβατώρα (MWh)* που παράγουν.

Πληρώνοντας την οριακή τιμή του συστήματος για όλη την παραγωγή που αποδέχτηκε μπορεί να εμφανιστεί ένα εκπληκτικό ποσό. Ο βασικός λόγος αυτής της *«πληρωμής σαν προμήθεια»* φαίνεται να μην είναι υιοθετημένος, είναι για τους παραγωγούς από την υποβολή προσφορών που κατοπτρίζουν την οριακή τιμή της παραγωγής τους. Όλοι οι *παραγωγοί* μπορούν εκτός από το να *μαντέψουν την οριακή τιμή* του συστήματος και την *προσφορά* σε αυτό το επίπεδο, μπορούν να *συλλέξουν τις μικρότερες απώλειες*. Στην καλύτερη περίπτωση η *οριακή τιμή* του συστήματος μπορούσε να μείνει *απαράλλαχτη*. Η αξία της οριακής τιμής του συστήματος υπερεκτιμάται από τις μονάδες χαμηλού κόστους, και οι μονάδες αυτές προσφέρουν πολύ χαμηλά επίπεδα. Αυτές οι μονάδες είναι έξω από το πρόγραμμα και αντικαθίστανται από γεννήτριες υψηλότερου οριακού κόστους παραγωγής. Η οριακή τιμή του συστήματος μπορεί μετά να είναι λίγο υψηλότερη από ότι θα μπορούσε να είναι. Επιπλέον, η τιμή των μονάδων πιθανόν να αυξηθεί ελαφρώς για να αποζημιώσουν τους εαυτούς τους για το πρόσθετο ρίσκο από το χάσιμο προσόδου, λόγω αβεβαιότητας της οριακής τιμής του συστήματος.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ

Για κάθε εμπόρευμα, οι ανισορροπίες σχεδόν πάντα φτάνουν το ποσό ανάμεσα στην ομάδα που έχει σύμβαση να αγοράσει ή να πουλήσει και στο ποσό που χρειάζεται ή μπορεί να παραχθεί. Οι *Αγοράς Άμεσης Παράδοσης* προσφέρουν ένα μηχανισμό για το χειρισμό αυτών των ανισορροπιών. Αν η ηλεκτρική ενέργεια αντιμετωπίζεται σαν εμπόρευμα, η αγορά άμεσης παράδοσης πρέπει να οργανωθεί. Δυστυχώς, οι ανισορροπίες ανάμεσα στην παραγωγή και στο φορτίο πρέπει να διορθωθούν τόσο γρήγορα που ο Μηχανισμός της Συμβατικής Αγοράς Άμεσης Παράδοσης δεν είναι εφικτός. Αντιθέτως, στο *Διαχειριστή Του Συστήματος* είναι δοσμένη η ευθύνη να συντηρεί την ισορροπία του συστήματος, χρησιμοποιώντας την *Διαχείριση Της Αγοράς Άμεσης Παράδοσης*. Αυτός ο μηχανισμός είναι μια αγορά που χρησιμοποιείται να φτάσει στην *ισορροπία*, προσφέρεται ελεύθερα από τους συμμετέχοντες σε μια τιμή που επιλέγουν οι ίδιοι. Είναι μια Αγορά Άμεσης Παράδοσης γιατί καθορίζει την τιμή στην οποία έχουν τεθεί οι ανισορροπίες. Παρόλα αυτά, είναι μία *Διαχείριση της Αγοράς* γιατί οι προσφορές και οι ζητήσεις επιλέγονται από μια τρίτη ομάδα το *Διαχειριστή Του Συστήματος* και όχι μέσω των *Διμερών Συμφωνιών*.

ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΠΟΡΩΝ

Αν το ποσό ενέργειας που θα καταναλωθεί ή θα παραχθεί προβλέπονταν σε *επαρκή χρόνο ανταπόκρισης και με ακρίβεια από τους συμμετόχους*, ο Διαχειριστής Του Συστήματος δεν θα έπρεπε να πάρει δράσεις εξισορρόπησης. Οι συμμετοχοί θα εμπορευόνταν για να *καλύψουν τα ελλείμματά τους και να απορροφήσουν τα πλεονάσματά τους*. Πρακτικά, υπάρχουν πάντα μικρές ανισορροπίες και ο Διαχειριστής Του Συστήματος πρέπει να αποκτήσει *προσαρμογές στην παραγωγή ή στο φορτίο*. Ενσωματώνοντας στο χρόνο τις προσαρμογές αυτές, τις μεταφράζουμε σε *αγορές και πωλήσεις* της ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να τεθεί στην Άμεση Τιμή (Spot Price) αντανακλώντας την προθυμία της αγοράς να δώσει αυτές τις προσαρμογές. Κρατώντας την Άμεση Τιμή και ελεύθερη τη φιλοσοφία της αγοράς, σε κάποια ομάδα που είναι πρόθυμη να προσαρμόσει την παραγωγή της ή την κατανάλωσή της, θα μπορούσε να της επιτραπεί να πράττει αναλόγως σε μια ανταγωνιστική βάση. Αυτό θα μπορούσε να δώσει στο Διαχειριστή Του Συστήματος μεγαλύτερη πιθανή επιλογή εξισορρόπησης των επιλογών και θα μπορούσε να βοηθήσει τη μείωση του κόστους εξισορρόπησης. Οι υπηρεσίες εξισορρόπησης για μια συγκεκριμένη περίοδο προσφέρονται από τους συμμετέχοντες της αγοράς στην *Διαχειριστή Του Συστήματος* μετά την ανοιχτή αγορά ενέργειας για την περίοδο που έκλεισε. Οι μονάδες παραγωγής που δεν είναι πλήρεις φορτίου, μπορούν να υποταχτούν στις προσφορές για να αυξήσουν την απόδοση. Μια μονάδα παραγωγής μπορεί επίσης να προσφερθεί να πληρώσει για να ελαττώσει την παραγωγή της. Αυτή είναι μια επικερδής θέση, αν η επιπρόσθετη τιμή από αυτή την προσφορά είναι μικρότερη από το επιπρόσθετο κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή τη μονάδα. Μια μονάδα παραγωγής που υποτάσσεται σε μια τέτοια προσφορά προσπαθώντας να αντικαταστήσει τη δική του παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια αγορασμένη από την αγορά άμεσης παράδοσης.

Η μεριά της ζήτησης μπορεί επίσης να προσφέρει εξισορρόπηση των πόρων. Αν ένας καταναλωτής μπορούσε να προσφέρει για να ελαττώσει την κατανάλωσή του, τότε η τιμή είναι καλύτερη από την αξία, παίρνει μέρος καταλώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια στη διάρκεια της περιόδου..

Από τότε που οι προσφορές τα εξισορρόπησης των πόρων υποβάλλονται πριν από πραγματικό χρόνο, ο Διαχειριστής Του Συστήματος μπορεί να ενδιαφερθεί για το ποσό ή την τιμή της εξισορρόπησης πόρων που θα προσφέρεται. Για την προστασία μας από τέτοια προβλήματα, ο Διαχειριστής Του Συστήματος μπορεί να αγοράσει εξισορροπημένους πόρους σε *μακροπρόθεσμη βάση*. Κάτω από τέτοια συμβόλαια, ο προμηθευτής πληρώνεται μια σταθερή τιμή για να κρατήσει διαθέσιμη κάποια ικανότητα παραγωγής. Το συμβόλαιο προσδιορίζει την τιμή ή στη σταθερή τιμή που πρέπει να πληρωθεί για κάθε μεγαβατώρα που παράγεται στην αίτηση του Διαχειριστή Του Συστήματος. Ο Διαχειριστής Του Συστήματος μπορούσε να καλέσει στο συμβόλαιο μόνο αν η σταθερή τιμή είναι χαμηλότερη από ότι θα έπρεπε να πληρώσει για παρόμοιες εξισορροπήσεις πόρων που προσφέρονται στα *βραχυπρόθεσμα συμβόλαια*. Αυτά τα συμβόλαια είναι ισοδύναμα με την επιλογή των συμβολαίων που χρησιμοποιούνται στις οικονομικές και στις εμπορικές αγορές. Ο σκοπός τους είναι να *προστατέψουν τον αγοραστή* (εδώ τον Διαχειριστή Του Συστήματος) από την αύξηση της τιμής εξασφαλίζοντας κάποια έσοδα στον προμηθευτή.

Οι *ανισορροπίες λόγω των σφαλμάτων* στις προβλέψεις από τους συμμετόχους είναι *μικρές*, εξελίσσονται σταδιακά και προβλέπονται σε μια συγκεκριμένη έκταση. Οι ανισορροπίες όμως, που προκαλούνται από *βλάβες* είναι συνήθως *μεγάλες, απρόβλεπτες και ζαφνικές*. Είναι σημαντικό, ότι *όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας* που αποτελούν αντικείμενο διαπραγμάτευσης για να κρατήσουν το

σύστημα σε ισορροπία δεν έχουν την ίδια αξία. Ένα μεγαβαττ (MW) που αποκτιέται από την αυξανόμενη απόδοση του θερμικού εργοστασίου κοστίζει λιγότερο από ένα μεγαβαττ του φορτίου που πρέπει να ρίξει για να αποδείξει την κατάρρευση του συστήματος. Για να διατηρηθεί το σύστημα σε ισορροπία, ο Διαχειριστής Του Συστήματος μπορούσε να έχει πρόσβαση σε μια ποικιλία από εξισορροπήσεις πόρων. Όταν οι παραγωγοί και οι καταναλωτές προσφέρουν για να προμηθεύσουν την εξισορρόπηση των πόρων, οι προσφορές τους πρέπει να μην είναι μόνο ποσότητας αλλά και τιμής, αλλά επίσης και πόσο γρήγορα μπορεί να παραδοθεί η αλλαγή στην έκχυση του ρεύματος.

ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΠΟΡΤΑΣ (GATE CLOSURE)

Η εμπορία ενέργειας πρέπει να σταματήσει σε ένα σημείο πριν τον πραγματικό χρόνο για να δώσουμε στο Διαχειριστή Του Συστήματος τον χρόνο να ισορροπήσει το σύστημα. Οι διαχειριστές του συστήματος προτιμούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα γιατί τους δίνουν αρκετό χρόνο να φέρουν στη γραμμή ένα μεγάλο εργοστάσιο καύσης άνθρακα για να επανορθώσει το έλλειμμα στην παραγωγή. Από την άλλη, οι συμμετοχοί στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, προτιμούν συχνά μια μικρότερη πύλη γιατί μειώνει την έκθεση σε ρίσκα. Μια πρόβλεψη φορτίου υπολογισμένη μία ώρα νωρίτερα της πραγματικής ώρας είναι συχνά πιο ακριβής από ότι μία πρόβλεψη υπολογισμένη τέσσερις ώρες νωρίτερα. Ένας έμπορος της λιανικής μπορούσε να εμπορευτεί ηλεκτρονικά ως το τελευταίο λεπτό, για να αντιστοιχίσει τις αγορές του με το αναμενόμενο φορτίο. Αυτό θεωρείται προτιμώμενο για να αφήνεται στη διαχειριζόμενη αγορά άμεσης παράδοσης, στην οποία είναι εκτεθειμένος σε τιμές στις οποίες δεν έχει τον έλεγχο. Επίσης, οι μονάδες παραγωγής προτιμούν μικρότερο κλείσιμο πόρτας εξαιτίας του ρίσκου της ξαφνικής διακοπής της μονάδας. Από την άλλη, αν μια μονάδα αποτύχει πριν το κλείσιμο της πόρτας, η γεννήτρια μπορεί να προσπαθήσει να διορθώσει το έλλειμμα της παραγωγής αγοράζοντας στην καλύτερη δυνατή τιμή σε ηλεκτρονική συναλλαγή.

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ

Οι παραγωγοί και οι καταναλωτές πρέπει να πληροφορούν Διαχειριστή Του Συστήματος για τις θέσεις του συμβολαίου τους, δηλαδή πόση ενέργεια σκοπεύουν να παράγουν ή να καταναλώσουν στη διάρκεια της υπό εξέταση περιόδου (Figure 3.2). Ο Διαχειριστής Του Συστήματος συνδυάζει οποιαδήποτε πληροφορία με τη δική της πρόβλεψη από το φορτίο για να αποφασίσει να καθορίσει πόσο το σύστημα θα είναι εκτός ισορροπίας. Αν η παραγωγή υπερβαίνει το φορτίο, το σύστημα λέγεται *χρόνιο*. Αν συμβαίνει το αντίθετο, το σύστημα ονομάζεται *βραχυχρόνιο*. Στη συνέχεια, ο Διαχειριστής του Συστήματος θα αποφασίσει ποιές προσφορές και προτάσεις ισορροπίας θα χρησιμοποιήσει για την κάλυψη των ανισορροπιών.

Όταν μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας επιχειρήσει να λειτουργήσει στις ιδεατές δεξαμενές ηλεκτρικής ενέργειας, η συνάρτηση ισορροπίας θα πλησιάζει την ολοκλήρωση με την αγορά της ενέργειας, που θα είναι δύσκολο να διακριθεί ξεχωριστά.

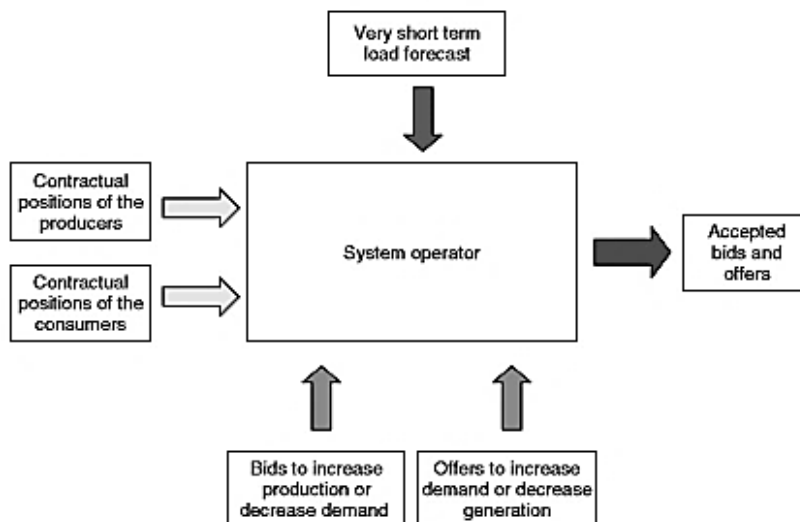


Figure 3.2 Schematic diagram of the operation of a managed spot market for electricity

Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ

Οι εμπορικές συναλλαγές διευθετούνται άμεσα ανάμεσα στα δύο εμπλεκόμενα μέρη ακολουθώντας τη διανομή των αγαθών από τον πωλητή στον αγοραστή, ο αγοραστής πληρώνει τη συμφωνηθείσα τιμή. Αν η παραδοθείσα ποσότητα είναι μικρότερη από αυτή που συμφωνήθηκε, ο αγοραστής εξουσιοδοτείται να παρακρατήσει μέρος της πληρωμής. Παρομοίως, αν ο αγοραστής καταναλώνει περισσότερο από τη συμφωνηθείσα ποσότητα, ο πωλητής εξουσιοδοτείται σε μια πρόσθετη πληρωμή. Η διαδικασία αυτή είναι πιο σύνθετη για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, γιατί συγκεντρώνεται στη διάρκεια της μεταφοράς από τους παραγωγούς στους καταναλωτές. Γι' αυτό χρειάζεται ένα συγκεντρωτικό σύστημα διακανονισμού.

Για τις διμερείς συναλλαγές στην ηλεκτρική ενέργεια, ο αγοραστής πληρώνει στον πωλητή τη συμφωνηθείσα τιμή, σαν η συμφωνηθείσα ποσότητα να είχε παραδοθεί. Παρομοίως, οι ανώνυμες συναλλαγές που διοργανώνονται μέσω της σθόνης βασισμένες στην εμπορία, είναι εγκατεστημένες μέσω της μεταβλητής από την ανταλλαγή ενέργειας, σα να είχαν εκτελεστεί με ακρίβεια. Παρόλα αυτά, θα υπάρχουν πάντα ανακρίβειες στην ολοκλήρωση των συμβολαίων. Αν ο παραγωγός αποτύχει στην παραγωγή του συμφωνηθέντος προς πώληση ποσού ενέργειας, το έλλειμμα δεν θα παρακρατηθεί από τη γεννήτρια του καταναλωτή. Αντί για να διατηρείται η σταθερότητα του συστήματος, ο διαχειριστής αγοράζει την ενέργεια αντικατάστασης. Παρομοίως, αν ο καταναλωτής ή ο έμπορος της λιανικής λιγότερο από το συμφωνηθέν, ο διαχειριστής του συστήματος πουλάει την υπέρβαση στη Διαχείριση Της Αγοράς Άμεσης Παράδοσης. Αυτές οι δραστηριότητες ισορροπίας κάνουν τα διμερή συμβόλαια να μοιάζουν σαν να έχουν εκπληρωθεί απόλυτα. Επίσης, φέρουν το κόστος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πληρωθέν χρηματικό ποσό από το διαχειριστή του συστήματος, για να αγοράσει ενέργεια αντικατάστασης δεν είναι ανάλογο του χρηματικού ποσού που αποκτιέται από την υπερβολή της ενέργειας. Οι μονάδες που είναι υπεύθυνες για τις ανισορροπίες του πρέπει να πληρώσουν το κόστος αυτών των δραστηριοτήτων ισορροπίας.

Στο πρώτο βήμα η διαδικασία διευθέτησης προϋποθέτει, για τον προσδιορισμό της καθαρής θέσης του για κάθε συμμετοχο της αγοράς. Σε αυτό το τέλος, κάθε παραγωγός πρέπει να αναφέρει στο διευθετημένο σύστημα το καθαρό ποσό ενέργειας που συμφωνήθηκε να πουληθεί για κάθε περίοδο, συμπεριλαμβανόμενη την εμπορευόμενη ενέργεια στη διαχείριση της αγοράς. Αυτό το ποσό αφαιρείται από το παραχθέν ποσό ενέργειας. Αν το αποτέλεσμα είναι θετικό, ο παραγωγός κρίνεται για την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας στο σύστημα. Από την άλλη πλευρά, αν το αποτέλεσμα είναι αρνητικό, ο παραγωγός αντιμετωπίζεται σα να έχει αγοράσει τη διαφορά από το σύστημα.

Όλοι οι μεγάλοι καταναλωτές και οι έμποροι λιανικής πρέπει να αναφέρουν το κανονικό ποσό ενέργειας που έχει συμφωνηθεί να αγοραστεί για κάθε περίοδο, συμπεριλαμβανομένης της εμπορευόμενης ενέργειας στη

διαχείριση της αγοράς. Αυτό το ποσό αφαιρείται από την ενέργεια που καταναλώνεται. Είναι συζητήσιμο αν το κόστος της προμηθευόμενης, από τους συμμετόχους, ενέργειας παρέχει βοηθητικές υπηρεσίες που θα συμπεριλαμβάνονται στην τιμή.

Ο διακανονισμός στη συγκεντρωτικά βασισμένη αγορά είναι πιο ευθύς γιατί όλες οι συναλλαγές λαμβάνουν μέρος στην ιδεατή δεξαμενή.

1.4: ΚΟΣΤΗ

ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ ΕΙΣΡΟΕΣ- ΕΚΡΟΕΣ (INPUTS - OUTPUTS)

Μια επιχείρηση παράγει y (ποσότητα), y είναι το μόνο αγαθό. Για να παραχθεί από την επιχείρηση χρειάζεται κάποια ενέργεια (κεφάλαιο) συντελεστές παραγωγής. Εξαρτώνται από τον τύπο της παραγωγής: πρώτες ύλες, labor (κόπος), γη, κτήρια ή μηχανές. Η δικιά μας επιχείρηση χρειάζεται μόνο 2 συντελεστές παραγωγής. Η παραγωγή σχετίζεται με την ενέργεια με συνάρτηση παραγωγής: $y = f(x_1, x_2)$.

$$y = \text{παραχθέν αγαθό}, x_1 = \text{λιπασμα} \quad x_2 = \text{χωράφι} = \text{σταθερό}$$

Όσο x_1 αυξάνεται, αυξάνεται και το παραχθέν αγαθό.

Ο βαθμός αύξησης της y μειώνεται όσο το x_1 μεγαλώνει. Αυτό ονομάζεται νόμος του φθίνοντος οριακού προϊόντος.

Ο όρος *Εισροές-Εκροές (Input- Output)* υποδηλώνει πόσο απαιτείται να παραχθεί από το μεταβλητό συντελεστή παραγωγής 1 καθορισμένο ποσό αγαθών.

ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (SHORT RUN)

Η *Βραχυχρόνια Περίοδος Διόρθωσης Παραγόντων Παραγωγής* είναι η χρονική περίοδος στην οποία μερικοί παράγοντες της παραγωγής διορθώνονται.

Στη Βραχυχρόνια Περίοδο Διόρθωσης Παραγόντων η παραγωγή εξαρτάται από 1 παραγωγικό παράγοντα. Αν θεωρήσουμε ότι \bar{x}_2 είναι η πάγια τιμή, η συνάρτηση της παραγωγής γίνεται συνάρτηση μιας μόνο μεταβλητής:

$$y = f(x_1, \bar{x}_2), \text{ (Figure 2.16)}$$

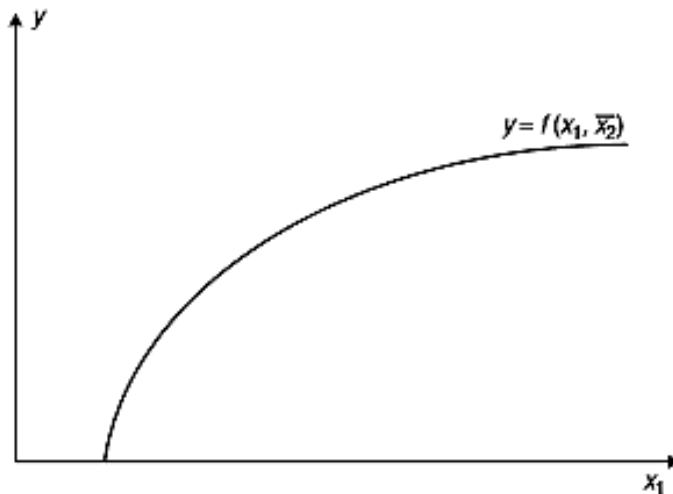


Figure 2.16 Typical short-run production function

Στη Βραχυχρόνια Περίοδο Διόρθωσης Παραγόντων, η παραγωγή συχνά εξαρτάται από ένα μόνο παράγοντα παραγωγής. Συχνά είναι εφικτό να καθορίσουμε την εισαγόμενη δύναμη με την παραγωγή σε μορφή συνάρτησης, που είναι η *αντίστροφη της συνάρτησης παραγωγής*, δηλαδή:

$$x_1 = g(y) \text{ για } x_2 = \bar{x}_2$$

Η εισαγόμενη δύναμη και η παραγωγή μας δείχνει πόσο χρειάζεται να παράγει η μεταβλητή για ένα συγκεκριμένο ποσό αγαθών.

Ένα Καλό Παράδειγμα είναι ενός Θερμοηλεκτρικού Σταθμού που μας δείχνει πόσα καύσιμα χρειάζονται για κάθε ώρα για την παραγωγή ενός ποσού ενέργειας.

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε τη συνάρτηση Βραχυχρόνιας Περιόδου Διόρθωσης Παραγόντων:

$$c_{SR}(y) = w_1 * x_1 + w_2 * \bar{x}_2 = w_1 * g(y) + w_2 * \bar{x}_2$$

Οι w_1, w_2 είναι τιμές των παραγόντων x_1, x_2 (figure 2,17).

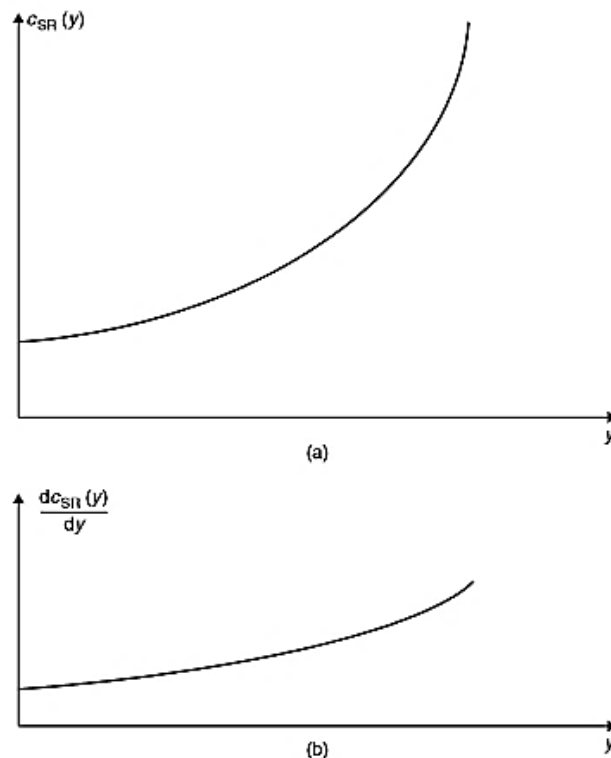


Figure 2.17 (a) Typical short-run cost function and (b) corresponding short-run marginal cost function

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω συναρτήσεις των Figure 2.16 και Figure 2.17 αποφασίζουμε τη συμπεριφορά της εταιρείας σε μια ανταγωνιστική αγορά. Ωστόσο, η μόνη πράξη για την αύξηση των κερδών τους, οι εταιρείες είναι η προσαρμογή της παραγωγής τους (output).

$$\max_y [\pi * y - C_{SR}(y)]$$

Optimum: $\frac{d[\pi * y - C_{SR}]}{dy} = 0 \leftrightarrow \pi = \frac{dC_{SR}}{dy}$

Η εταιρεία θα αυξήσει την παραγωγή της στο σημείο, που είναι το οριακό κόστος είναι ίσο με την τιμή της αγοράς. Αν η εταιρεία λειτουργούσε στο σημείο όπου το οριακό κόστος της αγοράς είναι μικρότερο από την τωρινή τιμή της αγοράς, θα αυξανόντουσαν τα κέρδη από την παραγωγή ενός άλλου προϊόντος και πουλώντας το στην αγορά. Αν είναι υψηλότερο θα κάνει εξοικονόμηση χρημάτων, χωρίς να παράγει το τελευταίο προϊόν.

Τα Κόστη των συντελεστών παραγωγής είναι σταθερά.

Συνάρτηση κόστους:

$$C(y) = C_V(y) + C_f, \quad \text{όπου } C_V(y) \text{ είναι τα μεταβλητά κόστη, } C_f = \text{πάγια κόστη}$$

Η *Συνάρτηση Μέσου Κόστους* (Average Cost Function) μετράει την παραγωγή ανά μονάδα και είναι ανάλογη με το Μέσο όρος Σταθερής Λειτουργίας (*Average Fixed Function*):

$$AC(y) = \frac{C(y)}{y} = \frac{C_V(y)}{y} + \frac{C_f}{y} = AVC(y) + AFC(y)$$

ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ

Οι λειτουργικές μονάδες ανάμεσα στα υψηλότερα και στα χαμηλότερα όρια, εμφανίζουν όμοια αυξανόμενα κόστη ανάλογα του λ . Μονάδες που λειτουργούν στη μέγιστη χωρητικότητα έχουν *αυξανόμενα κόστη μεγαλύτερα ή ανάλογα του λ* .

Ο *πολλαπλασιαστής λ* ερευνάται καθώς το *κόστος ευαισθησίας* του συστήματος αφορά τη *ζήτηση του συστήματος*.

Αν $\lambda = \lambda_{max}$ η Μονάδα 1 λειτουργεί στη *μέγιστη χωρητικότητα* και συναντά $\lambda > IC_1(P_{G1max})$ τότε:

1. Όταν η μονάδα 2 λειτουργεί στα όριά της συναντά την περίπτωση $\lambda = IC_2(P_{G2max})$
2. Για $\lambda = \lambda_B$ και οι δύο μονάδες λειτουργούν στα σχετικά όρια
3. Για $\lambda = \lambda_c$ η μονάδα 2 λειτουργεί στην *ελάχιστη ισχύ εξόδου*, και συναντά $\lambda < IC_2(P_{G2max})$, και η μονάδα 1 λειτουργεί στα όριά της.

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (LONG COSTS)

Η *Μακροχρόνια Περίοδος Διόρθωσης των Παραγόντων Παραγωγής* είναι η *χρονική περίοδος* επαρκώς *μακροχρόνια*, για να επιτρέψει σε όλους τους παράγοντες της παραγωγής να προσαρμόζονται. Η εταιρεία έχει περισσότερη ελαστικότητα στην απόφασή της πώς θα παράγει. Για παράδειγμα ένα εργοστάσιο θα είχε να αποφασίσει ανάμεσα στην αγορά ακριβότερων μηχανών και στη μείωση του κόστους εργασίας.

Η συνάρτηση της Μακροχρόνιας Περιόδου Διόρθωσης του Κόστους είναι η εξής:

$$C_{L,R}(y) = \min_{x_1, x_2} (w_1 * x_1 + w_2 * x_2) \text{ τέτοια ώστε } f(x_1, x_2) = y$$

ΣΤΑΘΕΡΑ ΚΟΣΤΗ (FIXED COSTS)

Short Run είναι οι παράγοντες που *διορθώνονται*, το *κόστος* που συνδέεται με αυτούς και δεν εξαρτάται με το ποσό παραγωγής *Σταθερά Κόστη Fixed Cost*.

Για παράδειγμα, αν μια εταιρεία παραγωγής που αγόρασε ένα οικοπέδο για το κτίσιμο ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτή την έκταση, το κόστος του οικοπέδου και του εργοστασίου δεν εξαρτώνται από το ποσό της παραγόμενης ενέργειας.

Τα *Quasi-fixed Costs* (*Ψευδο- πάγια κόστη*) είναι μια άλλη κατηγορία παγίων κοστών. Αυτά τα κόστη υπάρχουν, αν το εργοστάσιο καταναλώνει οποιοδήποτε ποσό παραχθείσας ενέργειας, αλλά δεν υπάρχει αν δεν καταναλώνει τίποτα.

Στο του εργοστασίου παραγωγής, συμπεριλαμβάνεται το κόστος καυσίμου για να ξεκινήσει η λειτουργία του να είναι πάγιο με την έννοια ότι δεν εξαρτάται από το ποσό της παραγόμενης ενέργειας του εργοστασίου.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΚΟΣΤΗ (VARIABLE COSTS)

Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει *Μεταβλητά Κόστη Variable Costs*, δηλαδή *Μεταβλητά Κόστη*. Για παράδειγμα, η καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμων στο εργοστάσιο είναι

μεταβλητό κόστος και για μια επέκταση το ανθρώπινο δυναμικό που χρειάζεται, εξαρτάται από την καταναλισκόμενη ενέργεια του εργοστασίου.

2: ΒΑΣΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

2.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αναλύοντας τα προβλήματα που σχετίζονται με την ελεγχόμενη λειτουργία των συστημάτων παραγωγής, υπάρχουν αρκετές ενδιαφέρουσες παράμετροι. Θεμελιώδης για το πρόβλημα της οικονομικής λειτουργίας είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών εισροών- εκροών από μια μονάδα θερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια τυπική μονάδα λέβητα- τουρμπίνας- γεννήτριας φαίνεται στο *Figure 2.1*. Αυτή αποτελείται από ένα λέβητα που παράγει ατμό για να οδηγήσει την τουρμπίνα παραγωγής σε σειρά. Η ηλεκτρική παραγωγή αυτής της σειράς συνδέεται και με το βοηθητικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του εργοστασίου. Μια τυπική μονάδα ατμοστρόβιλου(*steam turbine*) μπορεί να απαιτεί ανάμεσα στο 2-6% της ακαθάριστης αξίας της παραγωγής της μονάδας για τις βοηθητικές απαιτήσεις παραγωγής ενέργειας, απαραίτητες να οδηγήσουν το λέβητα να τροφοδοτήσει αντλίες, ανεμιστήρες, συμπυκνωτές κυκλοφορούντων αντλιών υγρού και άλλα. Στη διαδικασία του καθορισμού των χαρακτηριστικών της μονάδας, θα συζητηθεί το ακαθάριστο των εισροών (*gross input*) έναντι της καθαρής παραγωγής. Δηλαδή, το ακαθάριστο των εισροών του εργοστασίου αντιπροσωπεύει τις συνολικές εισροές (*total input*), είναι μετρημένες είτε σε δολάρια ανά ώρα ($\frac{\$}{h}$), είτε σε τόνους από κάρβουνα ανά ώρα, ή σε άλλες μονάδες μέτρησης. Η καθαρή παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας του εργοστασίου είναι ανάλογη της ηλεκτρικής χρησιμότητας του συστήματος. Περιστασιακά οι μηχανικοί αναπτύσσουν τα χαρακτηριστικά του ακαθάριστου εισροών- εκροών. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα δεδομένα μετατρέπονται σε καθαρή παραγωγή για να είναι πιο χρήσιμα στη χρονοδρομολόγηση της παραγωγής.

Στον καθορισμό των χαρακτηριστικών των τουρμπίνων των μονάδων ατμοστρόβιλων, θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι όροι:

$H =$ Btu ανά ώρα (*hour*) εισαγωγή θερμότητας στη μονάδα ή MBtu/h

$F =$ το κόστος των καυσίμων (*Fuel*) H είναι R ανά ώρα (*hour*) (R/h) εισαγωγή στη μονάδα για καύσιμα

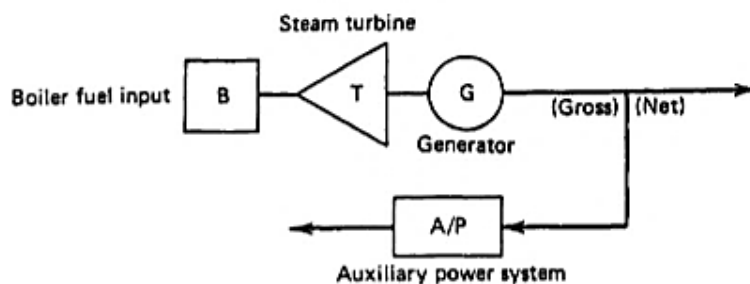


FIG. 2.1 Boiler-turbine-generator unit.

Το R ανά ώρα λειτουργώντας σαν το ρυθμό του κόστους της μονάδας θα συμπεριλαμβάνει την προϋπολογισμένη λειτουργία και τα κόστη συντήρησης. Δηλαδή, το κόστος εργαστηρίου για το λειτουργικό πλήρωμα θα συμπεριλαμβάνεται σαν ένα μέρος του λειτουργικού κόστους, αν αυτό εκφράζεται απευθείας συναρτήσει των εκροών της μονάδας. Οι εκροές της μονάδας παραγωγής θα σχεδιάζονται από P , το μεγαβάττ (MW) απεικονίζει την καθαρή παραγωγή της μονάδας.

Η *Figure 2.2* απεικονίζει τις εισροές- εκροές μιας μονάδας ατμοστρόβιλου στην ιδανική μορφή. Στον άξονα $y'y'$ απεικονίζονται οι εισροές είτε σε ενεργειακές απαιτήσεις MBtu/h είτε σε όρους του συνολικού

κόστους R/h . Η εκροή είναι η καθαρή ηλεκτρική παραγωγή της μονάδας και απεικονίζεται στην παρακάτω εξιδανικευμένη ομαλή κυρτή καμπύλη.

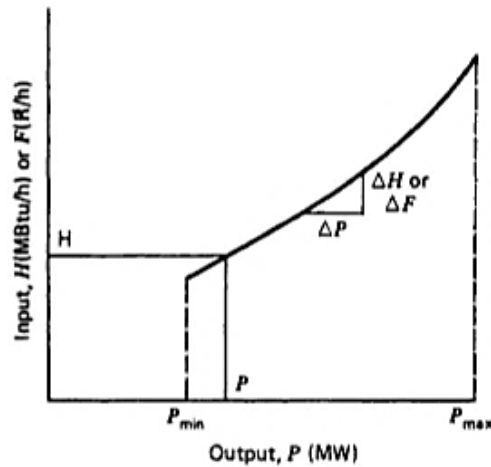


FIG. 2.2 Input-output curve of a steam turbine generator.

Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αποκτηθούν από τον υπολογισμό του σχεδιασμού ή δοκιμές του ρυθμού της θερμότητας. Όταν αυτές οι δοκιμές χρησιμοποιηθούν θα βρεθεί ότι τα σημεία των δεδομένων δεν συμπίπτουν με την εξιδανικευμένη ομαλή κυρτή καμπύλη. Οι μονάδες παραγωγής ατμοστροβίλων έχουν πολλά κρίσιμα προβλήματα. Γενικά, το ελάχιστο φορτίο που μια μονάδα λειτουργεί, επηρεάζεται περισσότερο από τον θερμοπαραγωγό και τον αναγεννητικό κύκλο παρά από την τουρμπίνα. Οι κρίσιμες παράμετροι για την τουρμπίνα είναι το μέταλλο του *κελύφους (shell)* και του *ρότορα (rotor)* για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Ο αυξανόμενος ρυθμός της χαρακτηριστικής θερμότητας για μια μονάδα τέτοιου τύπου φαίνεται στην Figure 2.3. Αυτός ο αυξανόμενος ρυθμός είναι η παράγωγος των χαρακτηριστικών εισροών- εκροών $\left(\frac{\Delta H}{\Delta P} \text{ ή } \frac{\Delta F}{\Delta P}\right)$. Αυτή η χαρακτηριστική χρησιμοποιείται στην οικονομική κατανομή της μονάδας, μετατρέπεται σε μια αυξανόμενου κόστους χαρακτηριστική από τον πολλαπλασιασμό του αυξανόμενου ρυθμού της θερμότητας σε Btu/KWh , επί του κόστους καυσίμου σε R/Btu . Συχνά προσεγγίζεται από μια αλληλουχία από ευθύγραμμα τμήματα.

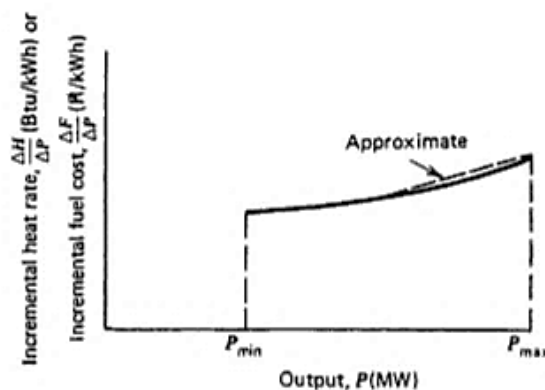


FIG. 2.3 Incremental heat (cost) rate characteristic.

Η τελευταία σημαντική χαρακτηριστική μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας είναι ο καθαρός ρυθμός της θερμότητας της μονάδας που απεικονίζεται στη *Figure 2.4*, αυτή η γραφική είναι H/P έναντι P . Είναι ανάλογο προς το αντίστροφο της συνήθους αναπτυγμένης χαρακτηριστικής της αποδοτικότητας για τη μηχανή. Οι χαρακτηριστικές του ρυθμού *θερμότητας* της *μονάδας* είναι μια συνάρτηση των παραμέτρων σχεδιασμού της μονάδας όπως αρχικές συνθήκες ατμού, στάδια αναθέρμανσης και θερμοκρασίες αναθέρμανσης, πίεση συμπυκνωτή, και την πολυπλοκότητα κύκλο του νερού της αναγεννητικής τροφοδοσίας.

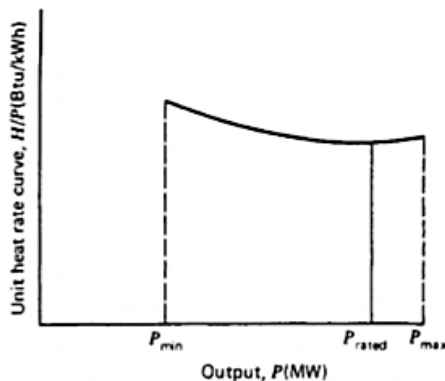


FIG. 2.4 Net heat rate characteristic of a steam turbine generator unit.

ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΙΣ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

Στη γραφική *Figure 2.2* απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές των μεγάλων ατμοηλεκτρικών τουρμπίνων παράγωγης, που έχουν έναν αριθμό από βαλβίδες ατμού εισαγωγής που ανοίγουν σε ακολουθία για να αποκτήσουν μια αυξανόμενη έξοδο για τη μονάδα. Η *Figure 2.6* δείχνει την εισροή, την εκροή και τον αυξανόμενο βαθμό θερμότητας που είναι χαρακτηριστικά για τη μονάδα με τις βαλβίδες. Όσο *αυξάνεται* η φόρτωση της *μονάδας*, *αυξάνεται* η *παράγωγή*, και *μειώνεται* ο *οριακός βαθμός θερμότητας* στα σημεία ανάμεσα για οποιεσδήποτε δυο βαλβίδες. Όταν ενεργοποιηθεί πρώτη φορά, οι *απώλειες στραγγαλισμού* *αυξάνονται* *ραγδαία* και ο *οριακός βαθμός θερμότητας* *αυξάνεται* *ραγδαία*. Έτσι καταλήγουμε στον *ασυνεχή* τύπο της *Figure 2.6*.

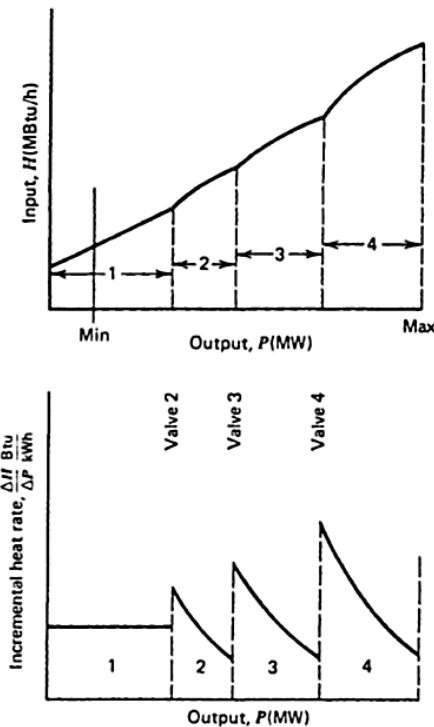


FIG. 2.6 Characteristics of a steam turbine generator with four steam admission valves.

Ένας άλλος τύπος μιας ατμοηλεκτρικής είναι το *common header plant* (κοινό εργοστάσιο κεφαλίδα), που περιέχει έναν αριθμό διαφορετικών λεβήτων συνδεδεμένων σε μια συνηθισμένη ατμοηλεκτρική γραμμή. Η *Figure 2.7* αυτό το εργοστάσιο δεν είναι μόνο ο αριθμός των λέβητας και των τουρμπινών, κάθε μια συνδεδεμένη στο *εργοστάσιο κεφαλίδα*, αλλά επίσης και μια *υψούμενη τουρμπίνα (topping turbine)* συνδεδεμένη στον *εργοστάσιο κεφαλίδα*. Η *υψούμενη τουρμπίνα* είναι μια στην όποια ο ατμός έρχεται από την τουρμπίνα και δεν τροφοδοτεί έναν συμπυκνωτή αλλά στη συνηθισμένη κεφαλίδα ατμού. Το *Κοινό Εργοστάσιο Κεφαλίδα (Common header plant)* θα έχει ένα διαφορετικό νούμερο χαρακτηριστικών παράγωγης και εξόδου, το αποτέλεσμα των διαφορετικών συνδυασμών των λεβήτων και των τουρμπινών συνδέεται στην επικεφαλίδα. Steinberg & Smith μεταχειρίστηκαν το εργοστάσιο αυτό εκτενώς. Τα *κοινά εργοστάσια κεφαλίδες* κατασκευάστηκαν όχι μόνο για να προσφέρουν *μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας* από ένα εργοστάσιο, αλλά και να εκπέμπουν *ατμό* για τη *θέρμανση* και την *ψύξη* από τα κτίρια σε αστικές περιοχές κατοικίας. Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ένας αριθμός από αυτά τα εργοστάσια εκσυγχρονίστηκαν από την εγκατάσταση, από την *υψούμενη τουρμπίνα Figure 2.7*.

Οι *Αεριοστρόβιλοι* χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των μονάδων παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικοί τύποι από τις μονάδες παράγωγης που προέρχονται από τους *Αεριοστρόβιλους Αεροσκαφών*, και άλλοι από τις *βιομηχανικές Τουρμπίνες Αερίου* που αναπτύχθηκαν για εφαρμογές, όπως *οδήγηση αντλιών αγωγού*. Σε άλλες εφαρμογές οι τύποι αυτοί είχαν διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας, που οι κινητήρες αεροσκαφών είχαν τέτοιους κύκλους λειτουργίας, όπου οι προϋποθέσεις της ενέργειας ποικίλουν πάνω από ένα προφίλ πτήσης.

Οι *Τουρμπίνες Αερίου* εφαρμόζονται σε *απλό και σε συνδυασμένο κύκλο*. Στον *Απλό Κύκλο* ο αέρας εισόδου συμπιέζεται σε ένα περιστρεφόμενο συμπιεστή και μετά αναμιγνύεται με *καμένο καύσιμο πετρέλαιο, ή αέριο σε θάλαμο καύσης*. Αυτές τις εκτάσεις των υψηλών θερμοκρασιών *αεριωδών προϊόντων* στην τουρμπίνα οδηγούν ο *συμπιεστής, τουρμπίνα και γεννήτρια*. Μερικά σχέδια χρησιμοποιούν μόνο τον *άξονα* για την *τουρμπίνα και συμπιεστή*, με τη γεννήτρια να οδηγείται σε *κατάλληλο σύνολο γραναζιών*. Σε *μεγαλύτερες μονάδες* οι γεννήτριες οδηγούνται αμέσως χωρίς γρανάζια. Τα *καυσαέρια* απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα σε μονάδες απλού κύκλου. Σε *Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου* τα *καυσαέρια* χρησιμοποιούνται για να παράγουν ατμό σε *γεννήτρια ατμού ανάκτησης θερμότητας* πριν από την *απόρριψή* τους.

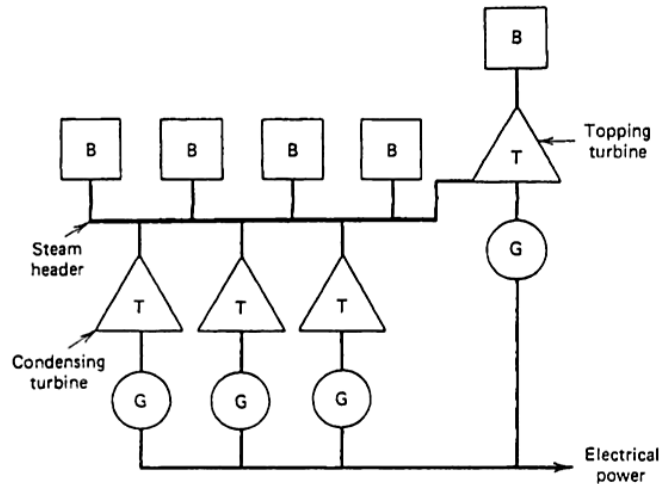


FIG. 2.7 A common-header steam plant.

Τα εργοστάσια *Συνδυασμένου Κύκλου* καυσάεργα υψηλής θερμοκρασίας από μία ή περισσότερες τουρμπίνες αερίου για να παράγουν ατμό, σε γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας, που χρησιμοποιούνται για να οδηγούν μια τουρμπίνα παραγωγής ατμού. Σε αυτά τα εργοστάσια υπάρχουν πολλά διοικητικά καθεστώτα, μερικά χρησιμοποιούν συμπληρωματικούς λέβητες που κάνουν καύση για την παροχή πρόσθετου ατμού. Το πλεονέκτημα του εργοστασίου *Συνδυασμένου Κύκλου* είναι η υψηλότερή του αποδοτικότητα. Οι αποδοτικότητες των εργοστασίων έχουν αναφερθεί στις τιμές ανάμεσα σε 6600 και 9000 Btu/kWh για τα αποδοτικότερα εργοστάσια.

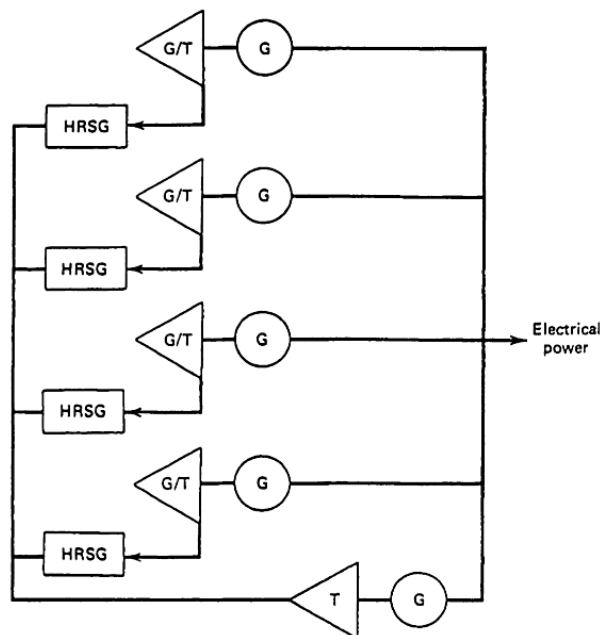


FIG. 2.9 A combined cycle plant with four gas turbines and a steam turbine generator.

Η *Figure 2.9* δείχνει τη διαμόρφωση ενός εργοστασίου *συνδυασμένου κύκλου* με τέσσερις τουρμπίνες αερίου, γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας και μια τουρμπίνα παραγωγής ατμού. Τα χαρακτηριστικά της αποδοτικότητας εξαρτώνται από τον αριθμό των τουρμπινών αερίου που είναι σε λειτουργία. Το σχέδιο του καθαρού ποσοστού θερμότητας απεικονίζεται στη *Figure 2.10*. Το αυξανόμενο ποσοστό θερμότητας τείνει να είναι πιο επίπεδο από ό, τι εκείνα που συνήθως εκδηλώνονται για τις τουρμπίνες ατμού.

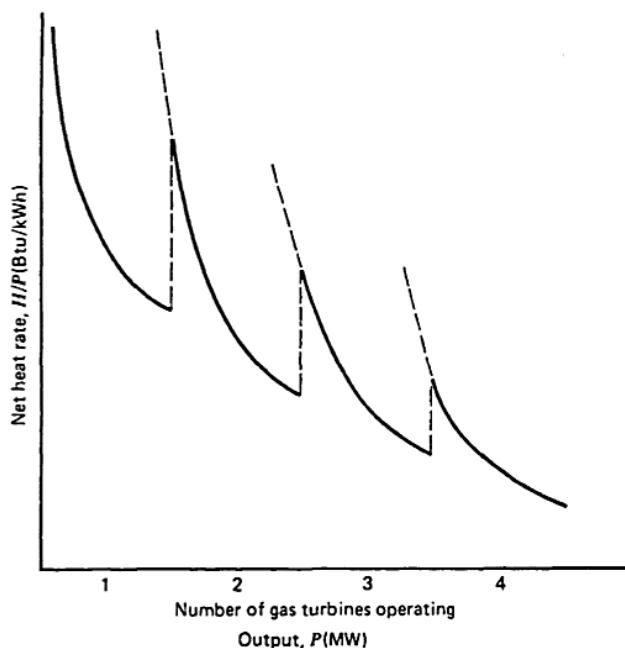


FIG. 2.10 Combined cycle plant heat rate characteristic.

ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι Μονάδες Συμπαράγωγής είναι παρόμοιες με τα κοινής κεφαλίδας ατμοηλεκτρικά εργοστάσια που είναι σχεδιασμένα να παράγουν ατμό και ηλεκτρική ενέργεια. Οι Μονάδες Συμπαράγωγής παράγουν ατμό για μια βιομηχανική διαδικασία, όπως ένα μια διαδικασία διύλισης πετρελαίου, χρησιμοποιείται για την αναφορά των μονάδων τηλεθέρμανσης. Στις Η.Π.Α. με τον όρο μονάδες τηλεθέρμανσης ορίζουμε την προμήθεια ατμού για τη θέρμανση των κτιρίων στο κέντρο της πόλης. Στην Ευρώπη, ο όρος αυτός συμπεριλαμβάνει την προμήθεια θερμότητας στη μορφή ζεστού νερού, ή ατμού για τα συγκροτήματα κατοικιών, συνήθως μεγάλα διαμερίσματα.

Το οικονομικό κίνητρο είναι ανάλογο στην υψηλή αποδοτικότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, «ολοκληρωμένοι κύκλοι» ή «topping cycles» που μπορούν να παράγουν ενέργεια σε ποσοστά θερμότητας 4000 Btu/kWh. Αυτό εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις των εργοστασίων για τη θερμότητα και για την ενέργεια, μια βιομηχανική εταιρία έχει μεγάλα ποσά υπέρβασης ηλεκτρικής ενέργειας διαθέσιμα προς πώληση σε ανταγωνιστικές αποδόσεις. Η ανάγκη της διαδικασίας παραγωγής της θερμότητας και του ατμού υπάρχει σε πολλές βιομηχανίες. Τα διυλιστήρια και τα χημικά εργοστάσια μπορούν να έχουν την ανάγκη για τη διαδικασία παραγωγής ατμού στις βιομηχανίες. Πολλές Βιομηχανίες χρησιμοποιούν τις μονάδες συμπαράγωγής που αποσπών ατμό για μικρά ή μεγαλύτερα εργοστάσια απλού ή συνδυασμένου κύκλου και παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια.

Πριν από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι μονάδες συμπαράγωγής ήταν μικρού μεγέθους και χρησιμοποιούσαν την εξόρυξη και τουρμπίνες ατμού για να οδηγήσουν μια γεννήτρια. Η μονάδα ήταν τυπικά μετρημένη για να προμηθεύει επαρκώς με ατμό για τη διαδικασία και την ηλεκτρική ενέργεια για την εσωτερική φόρτωση του εργοστασίου. Βάσει αντιγράφων ασφαλείας ατμού μπορεί να έχουν προμηθευτεί από έναν λέβητα, και μια ενδοσύνδεση στην τοπική χρησιμότητα παρεχόταν μια εφεδρική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις σχεδιάζονται γύρω από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου που μπορούν να ενσωματώσουν τους χωριστά λέβητες ατμού βαλμένοι φωτιά. Τα σχέδια κύκλων μπορούν να είναι σύνθετα και προσαρμόζονται στις απαιτήσεις των βιομηχανικών εγκαταστάσεων για την ενέργεια θερμότητας. Στις περιοχές (IPP) είναι μια αγορά για την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται από μη κύριες χρησιμότητα παραγωγικές εγκαταστάσεις, μπορούν να υπάρξουν ισχυρά οικονομικά κίνητρα για τη βιομηχανική εταιρία

για να αναπτύξουν ένα εργοστάσιο που μπορεί να παραδώσει την ενέργεια στο ηλεκτρικό σύστημα. Αυτό έχει εμφανιστεί στις Ηνωμένες Πολιτείες αφότου άρχισαν οι διάφοροι ρυθμιστικοί φορείς τις προσπάθειες να ενθαρρύνουν τον ανταγωνισμό παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, θίχτηκαν ενδιαφέροντα προβλήματα στο σχεδιασμό της χρήσης συστημάτων παραγωγής και μετάδοσης. Η βιομηχανική εταιρία μπορεί να έχει έναν κύκλο απαίτησης ατμού, από αυτό το επίπεδο, με συνέπεια ένα λιγότερο σταθερό επίπεδο ηλεκτρικής παραγωγής πρέπει να απορροφηθεί. Αφ' ετέρου το φορτίο της τοπικής χρησιμότητας μπορεί να είναι πολύ κυκλικό. Με ένα μικρό συστατικό της παραγωγής μη χρησιμότητας, μπορεί να μην αντιπροσωπεύσει το πρόβλημα. Εντούτοις, εάν η IPP συνολική παραγωγή ικανοποιεί μια αξιόλογη μερίδα της απαίτησης φορτίων χρησιμότητας, η χρησιμότητα μπορεί να έχει μια σύνθετη κατάσταση σχεδιασμού.

ΕΛΑΦΡΥ ΥΔΡΟ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

Οι χρήστες των Ηνωμένων Πολιτειών έχουν υιοθετήσει το συγκρατημένο αντιδραστήρα ελαφριού νερού ως «τυποποιημένο» τύπο πυρηνικού συστήματος ανεφοδιασμού ατμού. Αυτοί οι αντιδραστήρες είναι είτε αντιδραστήρες νερού (PWRs), είτε αντιδραστήρες βραστού νερού (BWRs) και η χρησιμοποιούνται ελαφρώς εμπλουτισμένοι με Ουράνιο (^{235}U), ως βασική πηγή ενεργειακού εφοδιασμού.

Το εμπλουτισμένο ουράνιο πρέπει να κατασκευαστεί στις συγκροτήματα καυσίμων από τη διαδικασία παραγωγής. Τότε οι συγκροτήματα καυσίμων φορτώνονται στον πυρήνα των πυρηνικών αντιδραστήρων, είναι μια ιδιαίτερη επένδυση που γίνεται σε αυτά τα καύσιμα. Κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου στην οποία τα καύσιμα είναι στον αντιδραστήρα και παράγουν τη θερμότητα, τον ατμό και την ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνει από τη γεννήτρια, το ποσό χρησιμοποιήσιμου διασπάσιμου υλικού στον πυρήνα μειώνεται. Σε κάποιο βαθμό, ο πυρήνας των αντιδραστήρων δεν είναι πλέον ικανός να διατηρήσει μια κρίσιμη κατάσταση στο κατάλληλο επίπεδο ισχύος, έτσι πρέπει να αφαιρούνται τα νέα καύσιμα που ξαναφορτώνονται στον αντιδραστήρα. Οι εμπορικοί αντιδραστήρες ισχύος σχεδιάζονται κανονικά για να αντικαταστήσουν από το ένα τρίτο, στο ένα πέμπτο των καυσίμων στον πυρήνα κατά τη διάρκεια της επαναφόρτωσης.

Σε αυτό το σημείο τα συγκροτήματα πυρηνικών καυσίμων που έχουν αφαιρεθεί είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά και πρέπει να αντιμετωπιστούν με κάποιο τρόπο. Αρχικά, επρόκειτο αυτά τα συγκροτήματα να υποβληθούν σε νέες εμπορικές εγκαταστάσεις και τα πολύτιμα υλικά που θα προέρχονται από την επεξεργασία του πυρήνα. Αμφισβητείται, εάν η βιομηχανία Αμερικανικών αντιδραστήρων θα αναπτύξει ένα οικονομικά βιώσιμο επεξεργασμένο σύστημα που είναι αποδεκτό στο κοινό γενικά. Εάν αυτό δεν γίνεται, είτε αυτοί οι ραδιενεργοί πυρήνες, θα πρέπει να αποθηκευτούν για κάποια απροσδιόριστη χρονική περίοδο ή η κυβέρνηση θα πρέπει να αναλάβει αυτά τα συγκροτήματα καυσίμων για την αποθήκευση και την ενδεχόμενη επεξεργασία. Εν πάση περιπτώσει, ένα πρόσθετο χρηματικό ποσό θα πρέπει να επενδυθεί, είτε στην επεξεργασία των καυσίμων είτε στην αποθήκευση του για κάποια χρονική περίοδο.

Ο υπολογισμός του «κόστους καυσίμων» σε μια κατάσταση όπως αυτό περιλαμβάνει τις οικονομικές και εκτιμήσεις λογιστικής είναι πραγματικά μια ανάλυση επένδυσης. Απλά, θα υπάρξει επένδυση δολαρίων σε ένα δεδομένο συγκρότημα πυρήνων. Αυτή η επένδυση δολαρίων περιλαμβάνει το κόστος του ουράνιου, που αλέθει τον πυρήνα ουράνιου, που τον μετατρέπει σε ένα αεριώδες προϊόν που μπορεί να εμπλουτιστεί, κατασκευάζοντας τα συγκροτήματα καυσίμων και τις παραδίδει στον αντιδραστήρα, συν το κόστος μετακίνησής τους ή εναποθήκευσής τους. Κάθε ένα από αυτά τα συγκροτήματα θα έχει παράγει ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα κόστος ψευδό-καυσίμων μπορεί να ληφθεί με τη διαχωριστική της συνολικής καθαρής επένδυσης σε δολάρια, από το συνολικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το συγκρότημα. Φυσικά, υπάρχουν βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν σε αυτόν τον απλό υπολογισμό. Παραδείγματος χάριν, είναι δυνατό με τη χρησιμοποίηση των πυρηνικών υπολογισμών φυσικής για να υπολογίσει ακριβέστερα το ποσό ενέργειας που παράγεται από ένα συγκεκριμένο συγκρότημα καυσίμων στον πυρήνα σε ένα δεδομένο στάδιο της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα.

Οι *Πυρηνικές Μονάδες* θα αντιμετωπιστούν σαν είναι *συνηθισμένες θερμικές παραγωγικές μονάδες* που τροφοδοτούνται από το *ορυκτό καύσιμο*. Οι *εκτιμήσεις* και οι *υπολογισμοί των ακριβών καυσίμων* που ξαναφορτώνουν τα προγράμματα και τα επίπεδα εμπλουτισμού στα διάφορα συγκροτήματα καυσίμων απαιτεί τη *λεπτομερή κατανόηση του κύκλου καυσίμων και των οικονομικών πτυχών της*.

ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

Ο *συστηματικός συντονισμός της λειτουργίας* ενός συστήματος εργοστασίων *υδροηλεκτρικής παραγωγής* είναι πιο σύνθετος από τον *προγραμματισμό όλων των θερμικών μονάδων παραγωγής*. Αυτό συμβαίνει γιατί τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια πρέπει να ενωθούν στον *ηλεκτρολογικό τομέα* (να μοιράζουν το ίδιο ρεύμα) και *υδραυλικό τομέα* (η εκροή του ενός εργοστασίου να είναι ένα πολύ σημαντικό τμήμα της εισροής ενός ή περισσότερων εργοστασίων).

Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια δεν είναι ίδια μεταξύ τους, εξαιτίας των φυσικών διαφορών στις λεκάνες απορροής, στις διαφορές της αποθήκης και στα στοιχεία απελευθέρωσης που χρησιμοποιήθηκαν για να ελέγξουν τη ροή του νερού και σε πολλούς διαφορετικούς και τεχνητούς περιορισμούς που επιβάλλονται στη λειτουργία του υδροηλεκτρικού συστήματος. Συστήματα των Ποταμιών θα είναι απλά σχετικά με των παραποτάμων, με φράγματα σε σειρά (υδραυλικά) κατά μήκος του ποταμού.

LONG RANGE- ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ

Το πρόβλημα *long- range μεγάλης εμβέλειας* περιλαμβάνει την πρόβλεψη της διαθεσιμότητας νερού και τον προγραμματισμό της δεξαμενής που απελευθερώνει νερό για ένα χρονικό διάστημα, που εξαρτάται από τη χωρητικότητα της δεξαμενής.

Ο *συντονισμός μεγάλης εμβέλειας* περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση μιας πολιτικής στο πλαίσιο μεταβλητών, όπως το ρεύμα, υδραυλικές εισροές και οι διαθεσιμότητες των μονάδων. Οι μεταβλητές αυτές, μεταχειρίζονται από τη στατιστική και ο συντονισμός μεγάλης εμβέλειας περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση τις μεταβλητές της στατικής. Χρήσιμες τεχνικές περιλαμβάνουν:

1. Το δυναμικό προγραμματισμό όπου ολόκληρη η περίοδος της λειτουργίας μεγάλης εμβέλειας προσομοιώνεται για μια συγκεκριμένη σειρά από προϋποθέσεων.
2. Τα σύνθετα μοντέλα υδραυλικών προσομοιώσεων, μπορούν να αναπαραστήσουν δεξαμενές.
3. Στατιστικά μοντέλα κόστους παραγωγής.

SHORT RANGE- ΜΙΚΡΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ

Το πρόβλημα *Short Range ή Μικρής Εμβέλειας* περιλαμβάνει τον προγραμματισμό «ώρα με την ώρα» ή «hour- by-hour» από όλο το σύστημα παραγωγής για να επιτευχθεί το ελάχιστο κόστος παραγωγής για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Το ρεύμα, οι εισροές και οι διαθεσιμότητες των μονάδων είναι υπολογισμένες και γνωστές. Μια σειρά από αρχικές συνθήκες είναι γνωστές, ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που ελαχιστοποιεί τον επιθυμητό σκοπό και οι ηλεκτρικοί περιορισμοί του συστήματος είναι γνωστά.

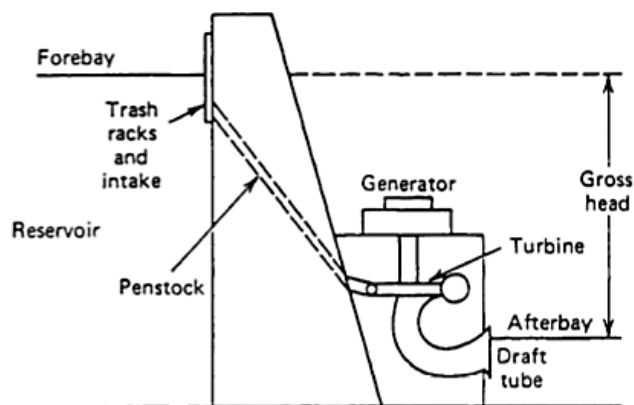


FIG. 7.1 Hydroplant components.

Οι υδροηλεκτρικές μονάδες έχουν χαρακτηριστικά εισόδου- παραγωγής παρόμοια με τους αεροστροβίλους. Η είσοδος είναι από την άποψη του όγκου του νερού ανά μονάδα χρόνου, η παραγωγή είναι από την άποψη της ηλεκτρικής ενέργειας. Η *Figure 2.12* δείχνει την τυπική γραφική παράσταση εισόδου παραγωγής ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου, όπου το υδραυλικό δίκτυο είναι σταθερό.

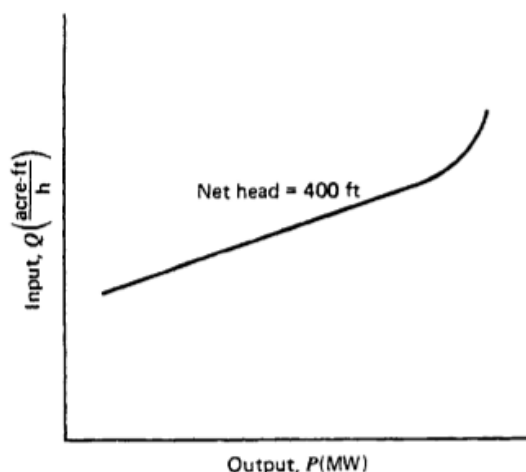


FIG. 2.12 Hydroelectric unit input-output curve.

Η χαρακτηριστική αυτή δείχνει μια γραμμική καμπύλη του εισαγόμενου απαιτούμενου όγκου νερού ανά μονάδα χρόνου, σαν μια συνάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αυξάνεται από το ελάχιστο στο μέγιστο ονομαστικό φορτίο. Πάνω από αυτό το σημείο, ο όγκος αυξάνεται καθώς η απόδοση της μονάδας μειώνεται. Τα χαρακτηριστικά του αυξανόμενου βαθμού του νερού φαίνονται στη *Figure 2.13*. Οι μονάδες αυτές είναι Αγγλικές, δηλαδή ο όγκος απεικονίζεται ως ένα στρέμμα νερού, και ένα πόδι βάθος.

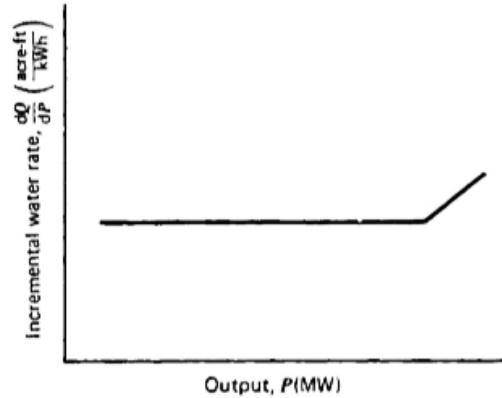


FIG. 2.13 Incremental water rate curve for hydroelectric plant.

Η *Figure 2.14* δείχνει τα χαρακτηριστικά εισόδου- εξόδου (παραγωγής) ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου. Τα χαρακτηριστικά αυτά υπάρχουν όποτε η παραλλαγή της δεξαμενής της αποθήκευσης και οι αυξήσεις μετά τον κόλπο είναι αρκετά μεγάλο ποσοστό του συνολικού υδραυλικού δικτύου. Κάνοντας χρονοδρομολόγηση των υδροηλεκτρικών εργοστασίων με ποικίλα χαρακτηριστικά κεφαλής δυσκολευόμαστε περισσότερο από τη χρονοδρομολόγηση των εργοστασίων με σταθερή κεφαλή. Αυτό επαληθεύεται όχι μόνο λόγω της ποικιλότητας των χαρακτηριστικών των εισροών- εκροών (παραγωγής) που πρέπει να θεωρηθεί, αλλά και το μέγιστο της ικανότητας του εργοστασίου που θα τείνει να ποικίλει με την υδραυλική κεφαλή. Στη *Figure 2.14*, ο όγκος του νερού που απαιτείται για την δοθείσα παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καθώς η κεφαλή αυξάνεται.

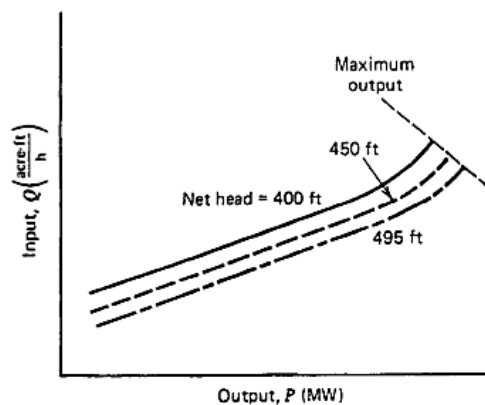


FIG. 2.14 Input-output curves for hydroelectric plant with a variable head.

Ο προγραμματισμός αποθήκευσης αντλίας των υδροηλεκτρικών εργοστασίων μπορεί να ολοκληρωθεί από την αναγκαιότητα της αναγνώρισης των ποικίλων αποτελεσμάτων κεφαλής. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να είναι εντονότερα στην ποικιλία της μέγιστης ικανότητας του εργοστασίου από την παρουσία πολλαπλών καμπυλών εισροών- εκροών. Η ποικιλία αυτή της μέγιστης ικανότητας μπορεί να έχει μια σημαντική επίδραση στις απαιτήσεις για την επιλογή ικανότητας να λειτουργούν με το σύστημα, δεδομένου ότι αυτός ο προγραμματισμός της αποθήκευσης αντλίας των υδροηλεκτρικών εργοστασίων μπορεί να θεωρηθεί ικανότητα στρεφόμενης εφεδρείας. Θα χρησιμοποιείται, δηλαδή, μόνο στις περιόδους παραγωγής υψηλότερου κόστους των θερμικών μονάδων, σε άλλες περιόδους θα θεωρούνται άμεσα διαθέσιμες. Στη διάρκεια των περιόδων όταν θα μπορούν να αντληθούν, θα απενεργοποιηθούν για ελαττώσουν τη ζήτηση.

2.2: ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ/ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Οι υδροηλεκτρικές μονάδες έχουμε τρεις γενικές κατηγορίες προβλημάτων. Αυτές εξαρτώνται από την ισορροπία μεταξύ της υδροηλεκτρικής παραγωγής, της θερμικής παραγωγής και του φορτίου.

Τα συστήματα χωρίς θερμική παραγωγή είναι σπάνια. Ο οικονομικός προγραμματισμός αυτών των συστημάτων είναι πραγματικά δύσκολο πρόβλημα στον προγραμματισμό του νερού που απελευθερώνεται για να ικανοποιήσει όλους τους υδραυλικούς περιορισμούς και να συναντήσει τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνικές του προγραμματισμού εξελίχθηκαν για τη χρήση σε ορισμένα συστήματα με την ανάθεση του κόστους ψευδό- καυσίμων και για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, όπως σε ένα συμβατικό υδροθερμικό σύστημα.

Το υδροθερμικό σύστημα, όπου το υδροηλεκτρικό σύστημα είναι μακράν η μεγαλύτερη συνιστώσα του, μπορεί προγραμματιστεί, με τον οικονομικό προγραμματισμό του συστήματος για την παραγωγή του ελάχιστου κόστους για τη θερμική μονάδα.

Η μεγαλύτερη κατηγορία των υδροθερμικών συστημάτων περιέχει αυτά τα οποία η πλησιέστερη ισορροπία τους είναι ανάμεσα στις υδροηλεκτρικές και θερμικές πηγές και αυτά όπου η υδροηλεκτρική τους παραγωγή είναι λόγος της συνολικής τους χωρητικότητας.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Υποθέτουμε, όπως στη Figure 7.3, έχουμε δύο πηγές ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρουν φορτίο, μια υδροηλεκτρική και μια ατμού.

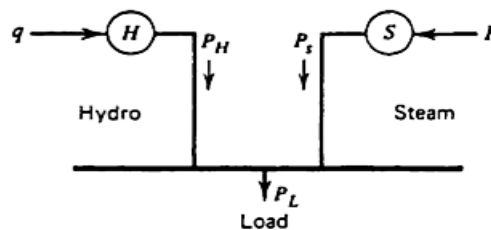


FIG. 7.3 Two-unit hydrothermal system.

Το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο προσφέρει μόνο του την ηλεκτρική ενέργεια για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (περίοδος j)

$$P_{Hj}^{max} \geq P_{loadj}, \quad j = 1 \dots j_{max} \quad (7.1)$$

Η ενέργεια που διατίθεται από την υδροηλεκτρική μονάδα είναι ανεπαρκής για την κάλυψη του φορτίου.

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} P_{Hj} n_j \leq \sum_{j=1}^{j_{max}} P_{loadj} n_j$$

$$n_j = 0 \text{ αριθμός των ωρών στην περίοδο } j \quad (7.2)$$

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} n_j = T_{max} = \text{συνολικό διάστημα}$$

Θα προτιμήσουμε να χρησιμοποιήσουμε το συνολικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας της υδροηλεκτρικής μονάδας όταν το κόστος του θερμικού ελαχιστοποιείται.

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} P_{loadj} n_j - \sum_{j=1}^{j_{max}} P_{Hj} n_j = E \quad (7.3)$$

P_{loadj} = Ενεργειακό Φορτίο P_{Hj} = Υδροηλεκτρική Ενέργεια E =
ενέργεια ατμού

Δεν απαιτούμε τη μονάδα ατμού να λειτουργεί για το διάστημα ωρών T_{max} .

Επομένως:

$$\sum_{j=1}^{N_s} P_{sj} n_j = E \quad (7.4)$$

N_s = αριθμός των περιόδων που η μονάδα ατμού λειτουργεί

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} n_j \leq T_{max}$$

Το πρόβλημα του προγραμματισμού γίνεται:

$$\text{Min} F_T = \sum_{j=1}^{N_s} F(P_{sj}) n_j \quad (7.5)$$

όποιος υπακούει σε:

$$\sum_{j=1}^{N_s} P_{sj} n_j - E = 0 \quad (7.6)$$

Και η συνάρτηση Lagrange:

$$L = \sum_{j=1}^{N_s} F(P_{sj}) n_j + a * \left(E - \sum_{j=1}^{N_s} P_{sj} n_j \right) \quad (7.7)$$

Μετά:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{sj}} = 0 \rightarrow \frac{dF(P_{sj})}{dP_{sj}} - a = 0 \quad j= 1 \dots N_s \quad (7.8)$$

$$\frac{dF(P_{sj})}{dP_{sj}} = a \quad j= 1 \dots N_s$$

Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα ατμού μπορεί να λειτουργήσει σε σταθερό αυξανόμενο κόστος ολόκληρη την περίοδο. Αφήνουμε αυτή τη βέλτιστη τιμή για τη μονάδα ατμού να είναι P_s^* , που είναι ίδια για όλα τα χρονικά διαστήματα που η μονάδα λειτουργεί. Η μονάδα αυτή φαίνεται στη Figure 7.4.

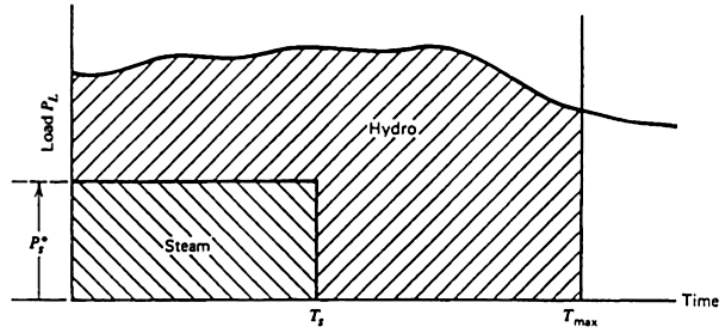


FIG. 7.4 Resulting optimal hydrothermal schedule.

Το συνολικό κόστος στη διάρκεια του χρονικού διαστήματος λειτουργίας είναι:

$$F_T = \sum_{j=1}^{N_s} F(P_s^*)n_j = F(P_s^*) \sum_{j=1}^{N_s} n_j = F(P_s^*)T_s \quad (7.9)$$

$$T_s = \sum_{j=1}^{N_s} n_j$$

Το κόστος της θερμικής μονάδας:

$$F(P_s) = A + BP_s + CP_s^2 \quad (7.10)$$

$$F_T = (A + BP_s^* + CP_s^{*2})T_s \quad (7.11)$$

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

$$\sum_{j=1}^{N_s} P_{sj}n_j = \sum_{j=1}^{N_s} F(P_s^*)n_j = P_s^*T_s = E \quad (7.12)$$

Στη συνέχεια:

$$T_s = \frac{E}{P_s^*} \quad (7.13)$$

Καθώς και:

$$F_T = (A + BP_s^* + CP_s^{*2}) \frac{E}{P_s^*} \quad (7.14)$$

Τώρα μπορούμε να ορίσουμε την τιμή P_s^* ελαχιστοποιώντας την F_T :

$$\frac{dF_T}{dP_s^*} = \frac{-AE}{P_s^{*2}} + CE = 0 \quad (7.15)$$

Η

$$P_s^* = \sqrt{A/C} \quad (7.16)$$

Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα που θα μπορούσε να λειτουργεί στο μέγιστο σημείο απόδοσης αρκετό καιρό για την παροχή της ενέργειας που απαιτείται, E .

$$F(P_s) = A + BP_s + CP_s^2 = f_c \times H(P_s) \quad (7.17)$$

Όπου f_c είναι το κόστος καυσίμου, και τότε το ποσοστό θερμότητας είναι:

$$\frac{H(P_s)}{P_s} = \frac{1}{f_c} \left(\frac{A}{P_s} + B + CP_s \right) \quad (7.18)$$

και το ποσοστό θερμότητας έχει το ελάχιστο όταν:

$$\frac{d \left[\frac{H(P_s)}{P_s} \right]}{dP_s} = 0 = -\frac{A}{P_s^2} + C \quad (7.19)$$

Δίνοντας την καλύτερη αποδοτικότητα στην σχέση:

$$P_s = \sqrt{A/C} = P_s^* \quad (7.20)$$

ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

Ένα περισσότερο βραχυπρόθεσμα πρόβλημα προγραμματισμού υδροθερμικής μονάδας προϋποθέτει ότι μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του κόστους των ενεργών θερμικών μονάδων (Figure 7.5).

Το πρόβλημα που συστάθηκε για την υδροθερμική μονάδα, όπου το σύστημα αναπαριστάνεται από την ισοδύναμη μονάδα (P_s), σε αυτή την περίπτωση έχουμε μια ενιαία υδροηλεκτρική μονάδα, (P_H). Υποθέτουμε ότι αυτή η μονάδα δεν είναι ικανή να προμηθεύσει όλη τη ζήτηση φορτίου στη διάρκεια της περιόδου και ότι εκεί είναι ο μέγιστος όγκος του νερού, που μπορεί να εκκενωθεί κατά τη διάρκεια της περιόδου T_{max} (ώρες).

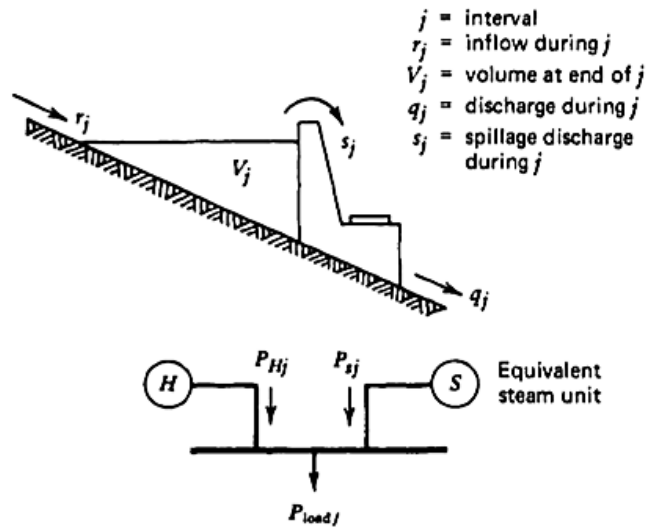


FIG. 7.5 Hydrothermal system with hydraulic constraints.

Υποθέτουμε ότι $s_j = 0$, η μόνη υδραυλική σταθερά που είχε αρχικά επιβληθεί είναι ο συνολικός όγκος του νερού που απορρίπτεται, πρέπει να είναι όπως ορίζεται:

ΠΡΟΒΛΗΜΑ:

$$\text{Min} F_T = \sum_{j=1}^{\max} n_j F_j \quad (7.21)$$

Που υπακούει σε:

$$\sum_{j=1}^{\max} n_j q_j = q_{\text{total}} = \text{Συνολικός όγκος του νερού}$$

$$P_{\text{load}j} - P_{Hj} - P_{Sj} = 0 : \text{ισορροπία φορτίου για } j = 1 \dots j_{\max}$$

n_j : το μήκος του j^{th} διαστήματος

$$\sum_{j=1}^{\max} n_j = T_{\max}$$

Τέλος, τα ρεύματα είναι σταθερά σε κάθε διάστημα. Άλλοι περιορισμοί είναι οι εξής:

$$V_j|_{j=0} = V_s : \text{Αρχικός Όγκος}$$

$$V_j|_{j=j_{\max}} = V_E : \text{Τελικός Όγκος}$$

$$q_{\min} \leq q_j \leq q_{\max} : \text{Όρια Ροής για } j = 1 \dots j_{\max}$$

$q_j = Q_j$: σταθερή απαλλαγή για μια συγκεκριμένη ώρα

$q = q(P_H)$ (7.22): για σταθερή λειτουργία της κεφαλής



FIG. 7.6 Hydroelectric unit input–output characteristic for constant head.

Συνάρτηση *Lagrange*:

$$L = \sum_{j=1}^{max} [n_j F_j + \lambda(P_{load j} - P_{Hj} - P_{sj})] + \gamma \left[\sum_{j=1}^{max} n_j q_j(P_{Hj}) - q_{tot} \right] \quad (7.23)$$

Για $j=k$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{sk}} = 0$$

$$n_k \frac{dF_{sk}}{dP_{sk}} = \lambda_k \quad (7.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Hk}} = 0$$

$$\gamma n_k \frac{dq_k}{dP_{Hk}} = \lambda_k \quad (7.25)$$

Υποθέτουμε ότι έχουμε τις απώλειες δικτύου τότε ισχύει για κάθε ώρα:

$$P_{load j} + P_{loss j} - P_{Hj} - P_{sj} = 0 \quad (7.26)$$

Και η συνάρτηση *Lagrange* γίνεται:

$$L = \sum_{j=1}^{max} [n_j F(P_j) + \lambda_j(P_{load j} + P_{loss j} - P_{Hj} - P_{sj})] - \gamma \left[\sum_{j=1}^{max} n_j q_j(P_{Hj}) - q_{tot} \right] \quad (7.27)$$

Με αποτέλεσμα τις εξισώσεις του συντονισμού (ώρα k):

$$n_k \frac{dF_{sk}}{dP_{sk}} + \lambda_k \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{sk}} = \lambda_k \quad (7.28)$$

$$\gamma n_k \frac{dq_k}{dP_{Hk}} + \lambda_k \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Hk}} = \lambda_k \quad (7.29)$$

Αυτό φέρνει ένα πιο σύνθετο αποτέλεσμα με τρεις βρόχους (*Figure 7.7*), σε αυτή τη διαδικασία λύσης, ϵ_1 και ϵ_2 είναι οι αντοχές των σχέσεων της ισορροπίας του φορτίου και του υδατικού ισοζυγίου. Αγνοούμε τους περιορισμούς του όγκου και της εκφόρτωσης.

Σαν αποτέλεσμα, η τιμή του γ θα είναι σταθερή στη διάρκεια της περιόδου που οι μονάδες παραμένουν στις αντίστοιχες σειρές προγραμματισμού τους. Η τιμή του γ θα αλλάξει, αν ένας περιορισμός π.χ. ($V_j = V_{max}$)θα συμπεριληφθεί.

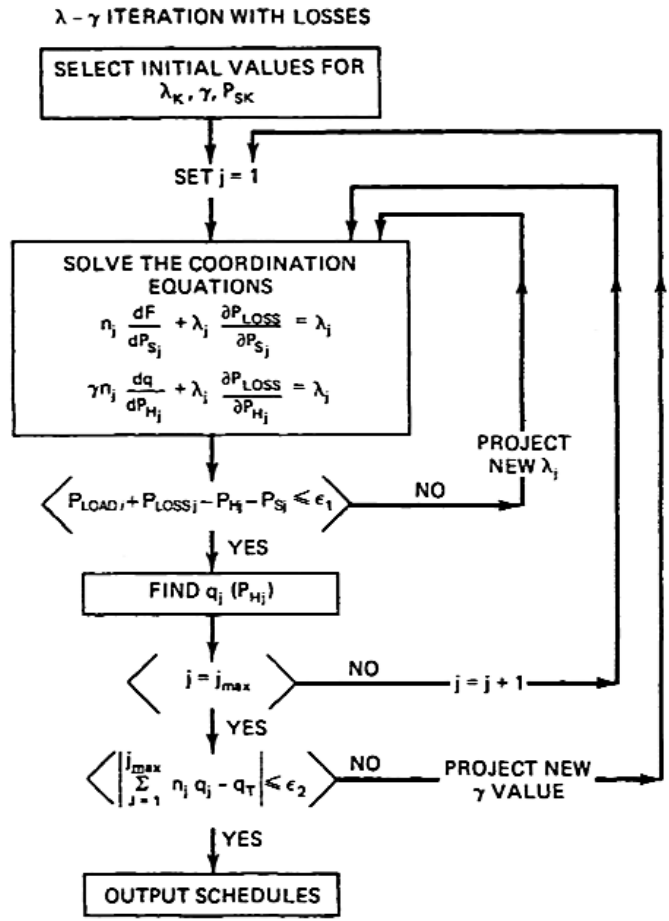


FIG. 7.7 A λ - γ iteration scheme for hydrothermal scheduling.

3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οικονομική κατανομή φορτίου συνίσταται στην κατανομή της συνολικής ζήτησης μεταξύ των μονάδων παραγωγής, έτσι ώστε το κόστος παραγωγής να ελαχιστοποιείται. Οι μονάδες παραγωγής έχουν διαφορετικό κόστος παραγωγής η κάθε μία, το οποίο εξαρτάται από την Κύρια Πηγή Ενέργειας (*Prime Energy Source*) που χρησιμοποιείται για να παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο και νερό σε ταμιευτήρες). Αυτά τα κόστη έχουν σημαντική διακύμανση. Για παράδειγμα, το οριακό κόστος για τις πυρηνικές μονάδες και τις μονάδες φυσικού αερίου μπορεί να κυμαίνονται ανάμεσα στα 0,03\$ και 0,20\$ ανά kWh.

Τέλος, οι συνεχείς αποφάσεις για τον τρόπο που θα κατανέμουμε τη ζήτηση ανάμεσα στις παραγόμενες ποσότητες, είναι απόφαση που υπολογίζουμε την παραγόμενη ισχύ όλων των ποσοτήτων. Τα οικονομικά της ηλεκτρικής παραγωγής, επίσης, ζητάνε ένα βέλτιστο χρονοδιάγραμμα κόστους εκκίνησης ή κλεισίματος των μονάδων παραγωγής. Για παράδειγμα, αν το πάγιο κόστος μιας μονάδας είναι υψηλό, θα είναι οικονομικότερο να κλείσει η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρά να λειτουργήσει σε μια χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας.

Κάθε μονάδα παραγωγής απεικονίζεται από μια συνάρτηση, και η συνάρτηση $C_i(P_{Gi})$ χαρακτηρίζει το κόστος παραγωγής σε \$/h. Α. Η λειτουργία αυτή προκύπτει από τον πολλαπλασιάζοντας την καμπύλη θερμότητας, εκφράζοντας το καύσιμο που καταναλώνεται για την παραγωγή 1MW ανά ώρα (h), επί το κόστος των καυσίμων που καταναλώνονται κατά τη διάρκεια αυτής της ώρας.

Η Συνάρτηση Κόστους προσεγγίζεται από μια κυρτή τετραγωνική ή τμηματικά γραμμική συνάρτηση, όπως στη *Figure 5.1*.

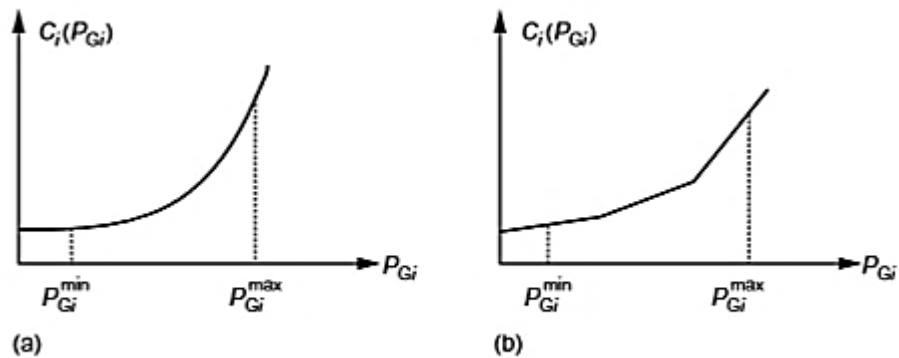


FIGURE 5.1 Examples of cost functions: (a) convex quadratic and (b) piecewise linear.

Η συνάρτηση της παραγωγής θεωρώντας n μονάδες παραγωγής είναι:

$$C(P_G) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (5.1)$$

P_{Gi} εκφράζει την ενέργεια που παράγεται σε MW/h

P_G είναι το διάνυσμα στήλης των επιπέδων παραγωγής μονάδας P_{Gi}

Αν το σύστημα έχει τη συνολική ζήτηση (P_D^{total}) και όλες οι μονάδες παραγωγής συνεισφέρουν ώστε να προμηθεύουν αυτή τη ζήτηση, η συνολική παραγωγή πρέπει να είναι ίση με την συνολική ζήτηση, συν τις απώλειες μεταφοράς, P_{loss} :

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D^{total} + P_{loss} \quad (5.2)$$

Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής αντιμετωπίζεται με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, $C(P_G)$ της (5.1) υποκειμένου στην εξίσωση εξισορρόπησης ισχύος (5.2) και στους λειτουργικούς περιορισμούς:

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (5.3)$$

3.2: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Πρόκειται για την *Οικονομική Κατανομή Χωρίς Απώλειες Μεταφοράς* ($P_{loss} = 0$) *Χωρίς Ορια Παραγωγής* και με την ζήτηση του συστήματος *ανελαστική*. Εφόσον ο μοναδικός περιορισμός είναι το *ισοζύγιο ισχύος* πρέπει να προμηθεύει, δηλαδή, η ισορροπία της ενέργειας, η *Lagrangian* γίνεται:

$$L(\mathbf{P}_G, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D^{total} \right) \quad (5.4)$$

Η *πρώτης τάξης Αναγκαίες Συνθήκες Βέλτιστου* είναι:

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial P_{Gi}} = IC_i(P_{Gi}) - \lambda = 0 \quad (5.5)$$

για $i = 1, \dots, n$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \lambda} = - \sum_{i=1}^n P_{Gi} + P_D^{total} = 0 \quad (5.6)$$

όπου $IC_i(P_{Gi})$ είναι το *οριακό κόστος της μονάδας i*: $IC_i(P_{Gi}) = \frac{dC(P_{Gi})}{dP_{Gi}}$ (5.7)

Το αποτέλεσμα της σχέσης (5.5) υποδηλώνει ότι σε αυτή την περίπτωση της *Οικονομικής Κατανομής*, όλες οι μονάδες πρέπει να λειτουργούν με το ίδιο οριακό κόστος το οποίο είναι ίσο με τον *πολλαπλασιαστή λ*. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι το *κοινό διαφορικό κόστος λ* επίσης συμπίπτει με το *συστηματικό οριακό κόστος*, δηλαδή με την *ευαισθησία του συνολικού κόστους* ως προς τη ζήτηση του συστήματος,

$$\lambda = \frac{dC(\mathbf{P}_G)}{dP_D^{total}} \quad (5.8)$$

Αν η ζήτηση του συστήματος μεταβάλλεται από ένα μικρό ποσό, dP_D^{TOTAL} , τότε το βέλτιστο σημείο είναι:

$$\sum_{i=1}^n dP_{Gi} = dP_D^{total} \quad (5.9)$$

Παρομοίως, η συνάρτηση του συνολικού κόστους γίνεται:

$$dC(\mathbf{P}_G) = \lambda * dP_D^{total} \quad (5.10)$$

που αποδεικνύει το επιθυμητό αποτέλεσμα

Από τη συνάρτηση κόστους:

$$C_i(P_i) = C_{0i} + a_i P_{Gi} + \frac{1}{2} b_i P_{Gi}^2 \quad (5.11)$$

Όπου C_{0i} είναι το σταθερό κόστος σε \$/h ενώ,

a_i σε $\frac{\$}{MWh}$, και b_i είναι σε $\$/ (MW)^2 h$:

Οι παραπάνω συναρτήσεις κόστους μπορούν να γραφούν σε συμπαγή μητρική μορφή ορίζοντας τα παρακάτω διανύσματα στήλης:

$$(5.12) \quad \begin{cases} \mathbf{C}_0 = [C_{01}, \dots, C_{0n}]^T \\ \mathbf{a} = [a_1, \dots, a_n]^T \\ \mathbf{b} = [b_1, \dots, b_n]^T \\ \mathbf{e} = [1, \dots, 1]^T \\ \mathbf{P}_G = [P_{G1}, \dots, P_{Gn}]^T \end{cases}$$

Καθώς και το Διαγώνιο πίνακα \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \text{diag}(\mathbf{b}) \quad (5.13)$$

Το Συνολικό κόστος μπορεί τότε να εκφραστεί ως:

$$C(\mathbf{P}) = \mathbf{e}^T \mathbf{C}_0 + \mathbf{a}^T \mathbf{P}_G + \frac{1}{2} \mathbf{P}_G \mathbf{B} \mathbf{P}_G^T \quad (5.14)$$

Η οποία είναι μια τετραγωνική συνάρτηση του διανύσματος παραγωγής \mathbf{P}_G

Το ισοζύγιο ισχύος μπορεί να εκφραστεί σε διανυσματική μορφή ως:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{P}_G = \mathbf{P}_D^{\text{total}} \quad (5.15)$$

Οι αναγκαίες συνθήκες (5.5) και (5.6) γίνονται:

$$\mathbf{a} + \mathbf{B} \mathbf{P}_G = \lambda \mathbf{e} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{e}^T \mathbf{P}_G = \mathbf{P}_D^{\text{total}} \quad (5.17)$$

Από την αναλυτική επίλυση των (5.16) και (5.17) προκύπτει:

$$\mathbf{P}_G = \lambda \mathbf{B}^{-1} \mathbf{e} - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{a} \quad (5.18)$$

Όπου το διαφορικό κόστος- πολλαπλασιαστής *Langrange* δίνεται από:

$$\lambda = \frac{\mathbf{P}_D^{\text{total}} + \mathbf{e}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{e}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{e}} \quad (5.19)$$

Είναι χρήσιμο να εκφράσουμε τα βέλτιστα επίπεδα συναρτήσει της ζήτησης. Χρησιμοποιώντας την (5.19) για να κάνουμε απαλοιφή του λ από (5.18) έχουμε:

$$\mathbf{P}_G = \alpha \mathbf{P}_D^{\text{total}} + \boldsymbol{\beta} \quad (5.20)$$

Οπού α και $\boldsymbol{\beta}$ ορίζονται από

$$\alpha = \frac{\mathbf{B}^{-1} \mathbf{e}}{\mathbf{e}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{e}} \quad (5.21)$$

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{(\mathbf{e}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{a}) \mathbf{B}^{-1} \mathbf{e}}{\mathbf{e}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{e}} - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{a} \quad (5.22)$$

Παρατηρούμε ότι το διάνυσμα α ορίζει τους συντελεστές συμμετοχής στο φορτίο, δηλαδή, τις αυξήσεις στην παραγωγή των μονάδων παραγωγής ώστε να ανταποκριθούν στην αύξηση ζήτησης του συστήματος. Εάν, η ζήτηση του συστήματος αλλάξει από dP_D^{total} , τότε τα επίπεδα παραγωγής θα αλλάξουν αντιστοίχως κατά:

$$dP_G = adP_D^{total} \quad (5.23)$$

3.2.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΥΠΟ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Θεωρήστε δύο μονάδες παραγωγής που προμηθεύουν με ηλεκτρική ισχύ φορτίο P_D^{total} . Η τετραγωνική συνάρτηση κόστους χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

Unit	$C_o(\$/h)$	$a(\$/MWh)$	$b(\$/(\text{MW})^2h)$	$P_G^{min}(\text{MW})$	$P_G^{max}(\text{MW})$
1	100	20	0.05	0	400
2	200	25	0.10	0	300

Η γενική λύση του εν λόγω προβλήματος οικονομικής κατανομής (βλ. Παράγραφο ανωτέρω) παράγει τα ακόλουθα αριθμητικά αποτελέσματα::

$$\lambda = \frac{650 + P_D^{total}}{30} \quad (\$/\text{MWh}) \quad (5.24)$$

$$P_G = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} P_D^{total} + \frac{100}{3} \\ \frac{1}{3} P_D^{total} - \frac{100}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{MW}) \quad (5.25)$$

Για τιμές της ζήτησης 40, 250, 300 και 600 MW οι βέλτιστες κατανομές φορτίου, διαφορικά κόστη (λ), συνολικά κόστη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Case	$P_D^{total}(\text{MW})$	$P_{G1}(\text{MW})$	$P_{G2}(\text{MW})$	$\lambda(\$/\text{MWh})$	$C(\$/h)$
A-Ex.5.1	40	60	-20	23	1110
B-Ex.5.1	250	200	50	30	6675
C-Ex.5.1	300	233.3	66.7	31.67	8217
D-Ex.5.1	600	433.3	166.7	41.67	19217

Αναλυτική Επίλυση Για Φορτίο

$$P_D^{total} = 250 \text{ MW}$$

Το ωριαίο κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού σε $\$/h$ είναι:

$$C_1(P_{G1}) = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2$$

$$C_2(P_{G2}) = 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2$$

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LANGRANGIAN:

$$\begin{aligned}
L &= \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) - \lambda \left[\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D^{total} \right] \\
&= 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 - \lambda[P_D - P_{G1} - P_{G2}] \\
&= \mathbf{100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 - \lambda[250 - P_{G1} - P_{G2}]}
\end{aligned}$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$\frac{\partial L(P_D, P_{G1}, \lambda)}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G1} = 20(\lambda - 20) \quad (1)$$

$$\frac{\partial L(P_D, P_{G1}, \lambda)}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda - 25) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
P_{G1} + P_{G2} &= P_D \leftrightarrow 20(\lambda - 20) + 10(\lambda - 25) = 250 \leftrightarrow 20\lambda - 400 + 10\lambda - 250 = 250 \leftrightarrow \\
30\lambda &= 900 \leftrightarrow \lambda^* = \mathbf{30}
\end{aligned}$$

Από την σχέση (1) προκύπτει:

$$P_{G1} = 20(\lambda - 20) \rightarrow P_{G1} = \mathbf{200MW}$$

Από την σχέση (2) προκύπτει:

$$P_{G2} = 10(\lambda - 25) \rightarrow P_{G2} = \mathbf{50MW}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 5100 + 1575 = \mathbf{6675€/h}$$

Επίλυση με απευθείας Εφαρμογή των τύπων:

$$\lambda = \frac{650 + P_D^{total}}{30} = \frac{650 + 250}{30} = \mathbf{30€/MWh}$$

$$P_{G1} = \frac{2}{3} * P_D^{total} + \frac{100}{3} = \frac{2}{3} * 250 + \frac{100}{3} = \mathbf{200 MW}$$

$$P_{G2} = \frac{1}{3} * P_D^{total} - \frac{100}{3} = \frac{1}{3} * 250 - \frac{100}{3} = \mathbf{50MW}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 5100 + 1575 = \mathbf{6675€/h}$$

3.3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ (ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ)

Λαμβάνοντας υπόψη και τα όρια της παραγωγής, ανελαστικά και τη ζήτηση ανελαστική και χωρίς να λάβουμε υπόψη τις απώλειες μεταφοράς, η *Lagrangian* γίνεται:

$$L(P_G, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D^{total} \right) - \sum_{i=1}^n \mu_i^{max} (P_{Gi} - P_{Gi}^{max}) - \sum_{i=1}^n \mu_i^{min} (P_{Gi} - P_{Gi}^{min}) \quad (5.34)$$

Όπου εμφανίζονται νέοι πολλαπλασιαστές, που αντιστοιχούν στις τιμές των ελαχίστων (*min*) και μεγίστων (*max*) επιπέδων μονάδα παραγωγής. Ο πολλαπλασιαστής μ_i^{max} σχετίζεται τη μέγιστη ισχύ της μονάδας, καθώς ο μ_i^{min} σχετίζεται με την ελάχιστη ισχύ.

Η Πρώτης Τάξης Αναγκαίες Συνθήκες είναι:

$$\frac{dL(\cdot)}{dP_{Gi}} = IC_i(P_{Gi}) - \lambda - \mu_i^{max} - \mu_i^{min} = 0, \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (5.35)$$

$$\frac{dL(\cdot)}{d\lambda} = - \sum_{i=1}^n P_{Gi} + P_D^{total} = 0 \quad (5.36)$$

Συμπεριλαμβάνοντας τις συμπληρωματικές συνθήκες χαλαρότητας έχουμε:

$$\mu_i^{max} \leq 0 \text{ αν } P_{Gi} = P_{Gi}^{max} \quad (5.37)$$

$$\mu_i^{max} = 0 \text{ αν } P_{Gi} < P_{Gi}^{max} \quad (5.38)$$

$$\mu_i^{min} \geq 0 \text{ αν } P_{Gi} = P_{Gi}^{min} \quad (5.39)$$

$$\mu_i^{min} = 0 \text{ αν } P_{Gi} > P_{Gi}^{min} \quad (5.40)$$

Σε περίπτωση που τα όρια παραγωγής επιβάλλονται, τότε η συνθήκη ισότητας του οριακού κόστους που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν είναι πλέον έγκυρη και αντικαθίσταται από το εξής κριτήριο, που προέρχονται από τις εξισώσεις (5.35) έως (5.40) :

$$\bullet IC_i(P_{Gi}) = \lambda + \mu_i^{min} \geq \lambda \text{ αν } P_{Gi} = P_{Gi}^{min} \quad (5.41)$$

$$\bullet IC_i(P_{Gi}) = \lambda \text{ αν } P_{Gi}^{min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{max} \quad (5.42)$$

$$\bullet IC_i(P_{Gi}) = \lambda + \mu_i^{max} \text{ αν } P_{Gi} = P_{Gi}^{max} \quad (5.43)$$

Ο πολλαπλασιαστής λ ακόμα και τώρα μπορεί να ερμηνευθεί σαν οριακό κόστος δηλαδή η *ευαισθησία* του *συνολικού κόστους* ως προς τη ζήτηση του συστήματος, $\lambda = \frac{dC(P_G)}{dP_D^{total}}$

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των (5.41) μέχρι (5.43) είναι η εξής: *μονάδες που λειτουργούν στα υψηλότερα και στα χαμηλότερα όρια τους*, εμφανίζουν ταυτόσημα διαφορικά *κόστη* και ίσα με λ . Οι μονάδες που λειτουργούν στη *μέγιστη δυνατότητα* του εργοστασίου έχουν *αυξανόμενα κόστη μεγαλύτερα ή ανάλογα του λ* .

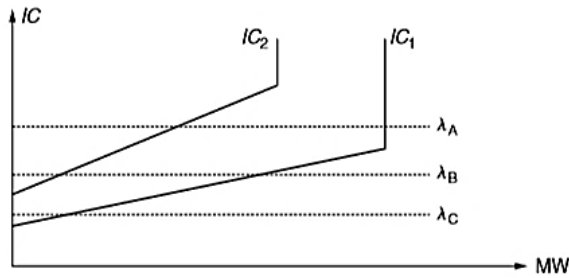


FIGURE 5.2 Three examples of economic dispatch with generation limits.

Οι συνθήκες στις εξισώσεις 5.41 έως 5.43 ερμηνεύονται ως εξής. Οι μονάδες που λειτουργούν εντός των ανώτερων και κατώτερων ορίων τους, εμφανίζουν ίδιο οριακό κόστος ισούται με λ . Οι μονάδες που λειτουργούν στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους έχουν οριακό κόστος μικρότερο ή ίσο με λ , ενώ οι μονάδες που λειτουργούν σε ελάχιστη ισχύ εξόδου τους έχουν οριακό κόστος μεγαλύτερο ή ίσο με λ . Εάν οι δύο μονάδες του Παραδείγματος 5.1 με μηδενική ελάχιστη ισχύ εξόδου θεωρείται, Σχήμα 5.2 απεικονίζει τις τρεις κατανομές φορτίου.

Αν $\lambda = \lambda_{max}$ η μονάδα 1 λειτουργεί στη δυνατότητα του εργοστασίου και συναντά $\lambda > IC_1(P_{G1max})$.

Όταν η μονάδα 2 λειτουργεί στα όριά της συναντά την περίπτωση $\lambda = IC_2(P_{G2max})$.

Για $\lambda = \lambda_B$ και οι δύο μονάδες λειτουργούν στα αντίστοιχα όριά τους.

Για $\lambda = \lambda_c$ η μονάδα 2 λειτουργεί στην ελάχιστη παραγωγή της μονάδας εξόδου, και ικανοποιεί την συνθήκη $\lambda < IC_2(P_{G2max})$, ενώ η μονάδα 1 λειτουργεί στα όριά της.

3.3.1 Ο ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ «λ Επανάληψης»

Αν οι συναρτήσεις κόστους είναι κυρτές, η λύση της οικονομικής κατανομής με όρια παραγωγής είναι μοναδική και εύκολη να υπολογιστεί. Παρόλα αυτά, μια αναλυτική λύση δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί, γιατί είναι αναγκαίο να σκεφτούμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των μονάδων αν συνεργάζονται στα αναμενόμενα όριά τους ή όχι, δηλαδή ένα δύσκολο συνδυαστικό πρόβλημα. Παρόλα αυτά, αν οι συνεργαζόμενες μονάδες που λειτουργούν στα όριά τους είναι γνωστές, οι παραμένουσες μονάδες πρέπει να συνεργαστούν σε ένα συγκεκριμένο οριακό κόστος και να συναντούν την υπόλοιπη ζήτηση που προκύπτει από την αφαίρεση των δεσμευτικών ορίων παραγωγής από την αρχική ζήτηση.

Για την επίλυση των διαδικασιών αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρόβλημα της περιορισμένης παραγωγής, δηλαδή ο γνωστός αλγόριθμος $\lambda - iteration$ (επανάληψης), που λειτουργεί ως εξής:

1. Ο πολλαπλασιαστής λ προσεγγίζεται από το $\lambda^{(v)}$.
2. Οι μονάδες παραγωγής προσεγγίζονται έτσι, ώστε οι βέλτιστες συνθήκες να είναι ικανοποιητικές, δηλαδή:

$$\text{Αν } IC_i(P_{Gi}^{min}) \geq \lambda^{(v)} \text{ τότε } P_{Gi} = P_{Gi}^{min}$$

$$\text{αλλιώς, αν } IC_i(P_{Gi}^{max}) \leq \lambda^{(v)} \text{ τότε } P_{Gi} = P_{Gi}^{max}$$

$$\text{αλλιώς υπολογίζουμε } P_{Gi} \text{ έτσι ώστε } IC_i(P_{Gi}) = \lambda^{(v)}$$

Το συνολικό επίπεδο παραγωγής υπολογίζεται προσθέτοντας τα επίπεδα παραγωγής με την ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση. Αν η ισορροπία είναι ικανοποιημένη μέσα σε ένα ποσοστό ανοχής η διαδικασία τελειώνει, αλλιώς συνεχίζουμε στο επόμενο βήμα.

3. Για να ενημερώσουμε το λ , χρησιμοποιείται ένας κανόνας διχοτόμησης:
 $\lambda^{(v+1)} = [\lambda^{(v)} + \lambda^{(v-1)}]/2$ με τις προηγούμενες τιμές του λ αντιστοιχίζον στο πλεόνασμα παραγωγής και στο έλλειμμα παραγωγής.

Είναι ενδιαφέρον, ότι ο πολλαπλασιαστής *Lagrange* λ μπορεί ακόμη να ερμηνευθεί ως *οριακό κόστος του συστήματος*, δηλαδή, η ευαισθησία του κόστους του συστήματος σε σχέση με τη ζήτηση συστήματος. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύεται με ένα παρόμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση *οικονομική κατανομή με ελαστική ζήτηση χωρίς όρια παραγωγής*, μια παράγωγο ο αναγνώστης που ενθαρρύνεται να πραγματοποιήσει.

Οι παραπάνω σχέσεις επαληθεύονται στην *Πρώτη*, στην *Δεύτερη* και στην *Τρίτη Περίπτωση* της *Οικονομικής Κατανομής Φορτίου*.

Στη *Figure 3.3* απεικονίζεται ένα διάγραμμα της μεθόδου *lambda.iteration* για την επίλυση όλων των θερμικών, κατανεμημένων απωλειών.

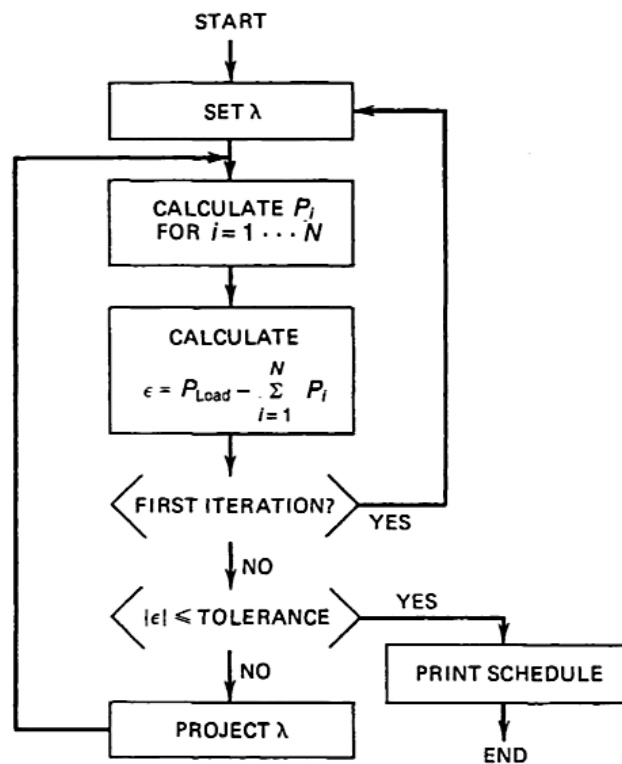


FIG. 3.3 Economic dispatch by the lambda-iteration method.

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σύστημα τριών μονάδων και θέλουμε *a* βρούμε το βέλτιστο οικονομικό σημείο. Μια λύση θα είναι να αναπαραστήσουμε γραφικά το αυξανόμενο κόστος για κάθε μία από αυτές τις τρεις μονάδες (*Figure 3.4*). Αντί να δημιουργήσουμε τα σημεία λειτουργίας κάθε μονάδας, που έχουμε το ελάχιστο κόστος και συγχρόνως τη ζήτηση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτά τα στοιχεία και να λύσουμε το πρόβλημα. Μπορούμε δηλαδή, να υπολογίσουμε το βαθμό του αυξανόμενου κόστους λ^* και την παραγωγή κάθε μονάδας για κάθε τιμή του αυξανόμενου κόστους.

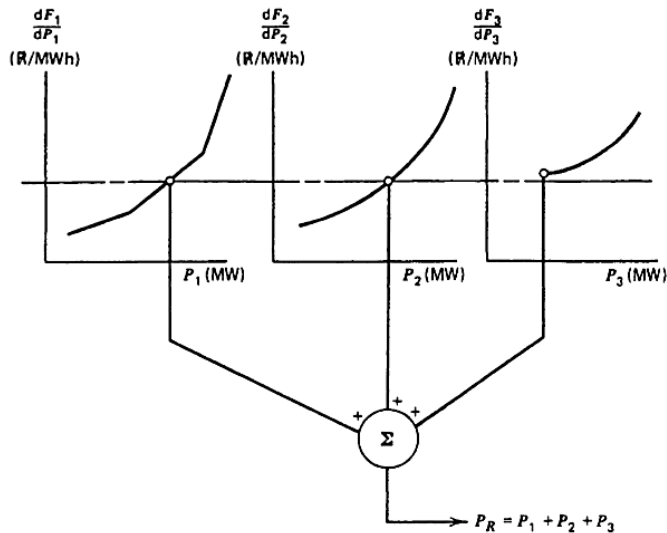


FIG. 3.4 Graphical solution to economic dispatch.

Η πρώτη μας εκτίμηση είναι φυσικά λάθος. Αν έχουμε υπολογίσει την τιμή του αυξανόμενου κόστους με την ηλεκτρική ενέργεια στη χαμηλότερη τιμή της, πρέπει να αυξήσουμε την τιμή του λ^* και να προσπαθήσουμε να βρούμε μια άλλη λύση. Με δύο λύσεις, μπορούμε να προεκτείνουμε τις λύσεις αυτές για να πλησιάσουμε στην επιθυμητή τιμή της συνολικής αποκτηθείσας ηλεκτρικής ενέργειας (Figure 3.5).

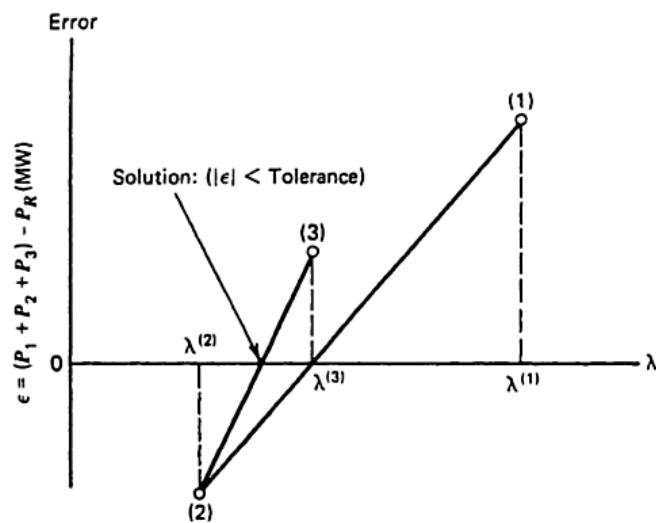


FIG. 3.5 Lambda projections.

Διατηρώντας το κομμάτι της συνολικής ζήτησης σε αντίθεση με το αυξανόμενο κόστος, μπορούμε ραγδαία να βρούμε το επιθυμητό λειτουργικό σημείο. Θα μπορούσαμε να παράγουμε μια ολόκληρη σειρά από τραπέζια που θα έδειχνε τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που θα παρεχόταν για διαφορετικά αυξανόμενα επίπεδα κοστών και συνδυαζόμενων μονάδων.

Η μέθοδος **lambda.iteration** συγκλίνει γρήγορα για αυτόν τον τύπο του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η πραγματική υπολογιστική διαδικασία είναι πιο σύνθετη από ό,τι φαίνεται στη Figure 3.3, αφού είναι υποχρεωτικό να συμπεριλάβουμε τα όρια παραγωγής για κάθε μια μονάδα κατά τη διάρκεια του υπολογισμού.

Η αρχική κατάσταση είναι γνωστή, και ψάχνουμε την ακολουθία των αποφάσεων, που αν εφαρμοστεί, μας δίνει μια ακολουθία καταστάσεων που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί κάποιο κριτήριο λειτουργίας του συστήματος.

3.3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΝΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ-ΦΥΣΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ μ_{imin}, μ_{imax}

ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (minimize)

$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ}$, στις Περιπτώσεις μας είναι η P_{Gi}

$$\text{ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΙΣΟΤΗΤΑΣ} \leftarrow \begin{cases} \omega_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \omega_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases}$$

$$\text{ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΝΙΣΟΤΗΤΑΣ} \leftarrow \begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\ g_p(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \end{cases}$$

Ένας δεσμευτικός περιορισμός ανισότητας είναι ένας περιορισμός ανισότητας που ικανοποιείται ακριβώς:

- Αν έχουμε $x_1 \leq x_1^{max}$
- Και η λύση που έχουμε είναι $x_1 = x_1^{max}$
- Τότε ο περιορισμός αυτός $x_1 \leq x_1^{max}$ είναι δεσμευτικός.

Όλοι οι περιορισμοί ανισότητας πρέπει να ικανοποιούνται και μόνο λίγοι πρέπει να είναι δεσμευτικοί σε συγκεκριμένο χρόνο. Αλλά δεν ξέρουμε στη διάρκεια του χρόνου, ποιοι περιορισμοί ανισότητας θα είναι δεσμευτικοί. Οι περιορισμοί ισότητας είναι πάντα δεσμευτικοί.

Από τις παραπάνω σχέσεις των περιορισμών ισότητας και ανισότητας η συνάρτηση *Lagrangian* είναι η εξής:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m, \mu_1, \dots, \mu_p) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \omega_k(x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^p \mu_j g_j(x_1, \dots, x_n)$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \omega_k(x) + \sum_{j=1}^p \mu_j g_j(x)$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_i} = 0 \leftrightarrow \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial \omega_k(x)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^p \mu_j \frac{\partial g_j(x)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial \lambda} = 0 \leftrightarrow \omega_k(x) = 0 \quad k=1, 2, \dots, m$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial \mu_j} = 0 \leftrightarrow g_j(x) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, p$$

ΣΥΜΠΛΗΡΩΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΧΑΛΑΡΟΤΗΤΑΣ

$$j = 1, 2, \dots, p \leftarrow \begin{cases} \mu_j g_j(x) = 0 \\ \mu_j \geq 0 \end{cases}$$

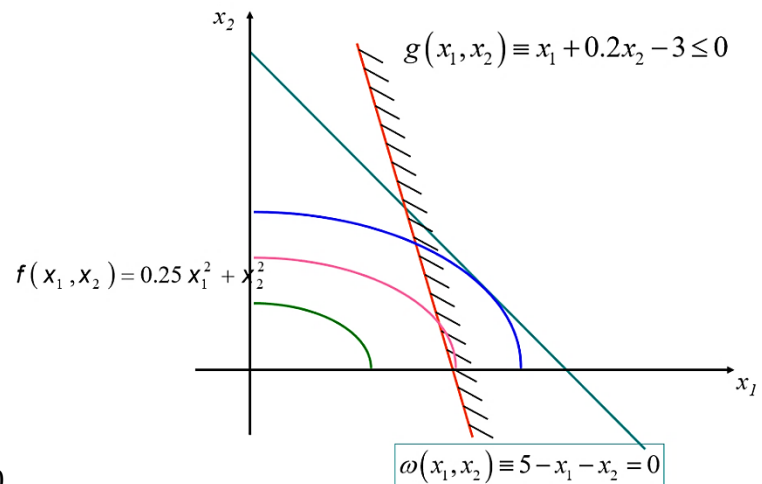
Έχουμε δύο πιθανότητες για κάθε περιορισμό j , της ισότητας και της ανισότητας:

- Αν ο $\mu_j(x) = 0$, τότε ο $g_j(x)$ είναι μη δεσμευτικός περιορισμός. Άρα έχουμε $g_j(x) < 0$
- Αν $g_j(x) = 0$, τότε ο περιορισμός $g_j(x)$ είναι δεσμευτικός και έχουμε $\mu_j(x) > 0$

Οι συνθήκες KKT δεν είναι αρκετές για την επίλυση του προβλήματος. Έτσι, οι συμπληρωματικές καταστάσεις χαλαρότητας μας δείχνουν έναν περιορισμό ανισότητας που είναι δεσμευτικός ή μη-δεσμευτικός, δεν μας ξεκαθαρίζουν ποιοι περιορισμοί είναι δεσμευτικοί και ποιοι όχι. Οι δεσμευτικοί πρέπει να προσδιορίζονται μέσω της δοκιμής και του λάθους. Οι δεσμευτικοί περιορισμοί πρέπει να προσδιορίζονται μέσα από το σφάλμα δοκιμής.

3.3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ $f(x_1, x_2) = 0.25x_1^2 + x_2^2$, ώστε $\omega_1(x_1, x_2) = 5 - x_1 - x_2$



και $g_1(x_1, x_2) = x_1 + 0.2x_2 - 3 \leq 0$

ΛΥΣΗ:

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LAGRANGIAN:

Η συνάρτηση Lagrange είναι:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x_1, x_2) + \lambda \omega(x_1, x_2) + \mu g(x_1, x_2) = 0.25x_1^2 + x_2^2 + \lambda(5 - x_1 - x_2) + \mu(x_1 + 0.2x_2 - 3)$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ (KKT ΣΥΝΘΗΚΕΣ):

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_1} = 0 \leftrightarrow 0.5x_1 - \lambda + \mu = 0$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_2} = 0 \leftrightarrow 2x_2 - \lambda + 0.2 * \mu = 0$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial \lambda} = 0 \leftrightarrow 5 - x_1 - x_2 = 0$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial \mu} = 0 \leftrightarrow x_1 + 0.2x_2 - 3 \leq 0$$

$$\mu g(x) = \mu(x_1 + 0.2x_2 - 3) = 0 \quad \text{και} \quad \mu \geq 0$$

Οι ΚΚΤ συνθήκες δεν δείχνουν αν ο περιορισμός ανισότητας είναι δεσμευτικός, για αυτό χρησιμοποιούμε τον προσδιορισμό δοκιμής και λάθους.

ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΟΥΜΕ: $\mu = 0$, ΑΡΑ ΔΕΝ ΕΧΟΥΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΑΝΙΣΟΤΗΤΑΣ $g(x)$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_1} = 0 \leftrightarrow 0.5x_1 - \lambda = 0 \rightarrow x_1 = 2\lambda \quad (1)$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_2} = 0 \leftrightarrow 2x_2 - \lambda = 0 \rightarrow x_2 = 0.5\lambda \quad (2)$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial \lambda} = 0 \leftrightarrow 5 - x_1 - x_2 = 0 \rightarrow 2.5\lambda = 5 \leftrightarrow \lambda^* = 2$$

Κάνοντας αντικατάσταση στις σχέσεις (1) και (2) βρίσκουμε ότι:

$$x_1 = 2 * \lambda^* \rightarrow x_1 = 4$$

$$x_2 = 0.5 * \lambda^* \rightarrow x_2 = 1$$

Εισάγοντας αυτές τις τιμές στους περιορισμούς ανισότητας έχουμε:

$$x_1 + 0.2x_2 - 3 = 1.2 \geq 0$$

Αυτή η λύση δεν είναι αποδεκτή, γιατί $g_1(x_1, x_2) = x_1 + 0.2x_2 - 3 \leq 0$

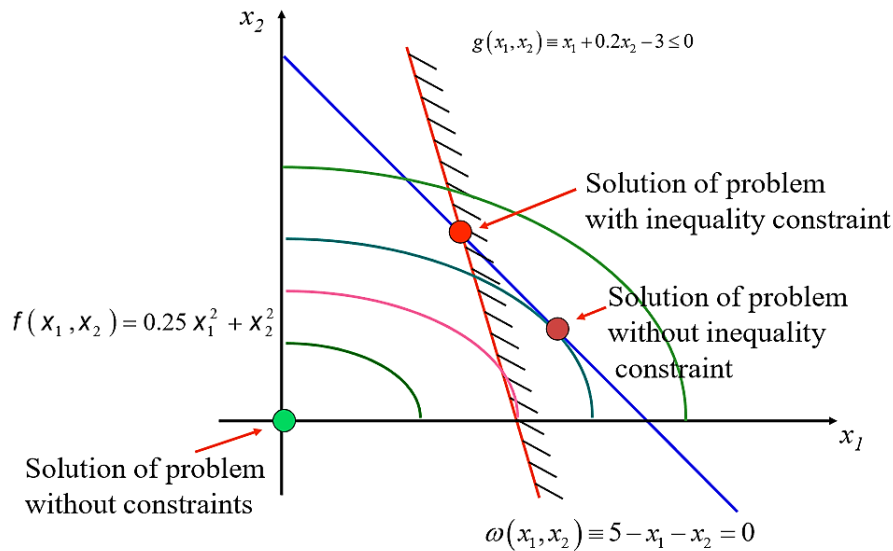
ΔΕΥΤΕΡΗ ΔΟΚΙΜΗ : $\mu = 0$

$$\begin{cases} \frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_1} = 0 \leftrightarrow 0.5 * x_1 - \lambda = 0 \rightarrow x_1 = 2.5 \\ \frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_2} = 0 \leftrightarrow 2 * x_2 - \lambda = 0 \rightarrow x_2 = 2.5 \end{cases}$$

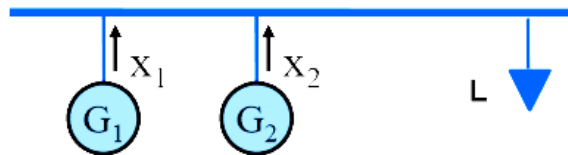
$$\begin{cases} \frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_1} = 0 \leftrightarrow 0.5 * x_1 - \lambda + \mu = 0 \leftrightarrow \lambda^* = 5.9375 \\ \frac{\partial L(x, \lambda, \mu)}{\partial x_2} = 0 \leftrightarrow 2 * x_2 - \lambda + 0.2 * \mu = 0 \leftrightarrow \mu = 4.6875 \end{cases}$$

Οι ΚΚΤ συνθήκες ικανοποιούνται, αυτή η λύση είναι αποδεκτή.

$$\mu g(x) = \mu(x_1 + 0.2x_2 - 3) = 0 \quad \text{και} \quad \mu \geq 0$$



3.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ



Ελαχιστοποίηση της $f(x_1, x_2) = C_1(x_1) + C_2(x_2)$

με Περιορισμό Ισότητας $\omega(x_1, x_2) = L - x_1 - x_2$

και Περιορισμούς Ανισότητας: $x_1^{\min} \leq x_1 \leq x_1^{\max} \rightarrow \begin{cases} g_1(x_1, x_2) \equiv x_1 - x_1^{\max} \leq 0 \\ g_2(x_1, x_2) \equiv x_1^{\min} - x_1 \leq 0 \end{cases}$

$x_2^{\min} \leq x_2 \leq x_2^{\max} \rightarrow \begin{cases} g_3(x_1, x_2) \equiv x_2 - x_2^{\max} \leq 0 \\ g_4(x_1, x_2) \equiv x_2^{\min} - x_2 \leq 0 \end{cases}$

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LANGRANGIAN:

Η συνάρτηση *Lagrange* είναι:

$$L = C_1(x_1) + C_2(x_2) + \lambda(L - x_1 - x_2) + \mu_1(x_1 - x_1^{\max}) + \mu_2(x_1^{\min} - x_1) + \mu_3(x_2 - x_2^{\max}) + \mu_4(x_2^{\min} - x_2)$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} \equiv \frac{dC_1}{dx_1} - \lambda + \mu_1 + \mu_2 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} \equiv \frac{dC_2}{dx_2} - \lambda + \mu_3 + \mu_4 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} \equiv L - x_1 - x_2 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_1} \equiv x_1 - x_1^{max} \leq 0 \quad \mu_1(x_1 - x_1^{max}) = 0, \mu_1 \geq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_2} \equiv x_1^{min} - x_1 \leq 0 \quad \mu_2(x_1^{min} - x_1) = 0, \mu_2 \geq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_3} \equiv x_2 - x_2^{max} \leq 0 \quad \mu_3(x_2 - x_2^{max}) = 0, \mu_3 \geq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_4} \equiv x_2^{min} - x_2 \leq 0 \quad \mu_4(x_2^{min} - x_2) = 0, \mu_4 \geq 0$$

ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΟΛΑ ΤΑ $\mu=0$

$$\frac{dC_1}{dx_1} = \frac{dC_2}{dx_2} = \lambda \leftrightarrow \begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_1} \equiv \frac{dC_1}{dx_1} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} \equiv \frac{dC_2}{dx_2} - \lambda = 0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} \equiv L - x_1 - x_2 = 0$$

Όλες οι γεννήτριες λειτουργούν στο ίδιο οριακό κόστος.

ΔΕΥΤΕΡΗ ΔΟΚΙΜΗ: $\mu_1 \neq 0, \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0$ Η ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1 ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΤΟ ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} \equiv \frac{dC_1}{dx_1} - \lambda + \mu_1 = 0 \leftrightarrow \frac{dC_1}{dx_1} = \lambda - \mu_1 \leq \lambda$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} \equiv \frac{dC_2}{dx_2} - \lambda = 0 \leftrightarrow \frac{dC_2}{dx_2} = \lambda$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} \equiv L - x_1 - x_2 = 0$$

Αρχικά βρίσκουμε την σχέση που συνδέει το κόστος της μονάδας 1, αντικαθιστώντας το κόστος x_1^{max} , με τη μεταβλητή λ και τη σταθερά μ_1 , ο πολλαπλασιαστής αυτός σχετίζεται με τη μέγιστη ισχύ παραγωγής της μονάδας. Μετά τη σχέση $\frac{dC_2}{dx_2} = \lambda$ και τη σχέση $L - x_1 - x_2 = 0$. Λύνουμε το σύστημα και βρίσκουμε ότι **δεν λειτουργούν** όλες οι γεννήτριες στο ίδιο οριακό κόστος. Το κόστος της μονάδας 1 είναι στη χαμηλότερη τιμή, γιατί ισχύει ότι $\frac{\partial L}{\partial \mu_1} \equiv x_1 - x_1^{max} \leq 0$ και $\mu_1 \geq 0$, στην επίλυση της σχέσης $\frac{\partial L}{\partial x_1} \equiv \frac{dC_1}{dx_1} - \lambda + \mu_1 = 0$ έχουμε $\frac{dC_1}{dx_1} = \lambda - \mu_1$ και έτσι το κόστος μειώνεται συναρτήσει του μ_1 .

ΤΡΙΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: $\mu_2 = 0, \mu_1 = \mu_3 = \mu_4 = 0$ Η ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1 ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΤΟ ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} \equiv \frac{dC_1}{dx_1} - \lambda + \mu_2 = 0 \leftrightarrow \frac{dC_1}{dx_1} = \lambda + \mu_2 \geq \lambda$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} \equiv \frac{dC_2}{dx_2} - \lambda = 0 \leftrightarrow \frac{dC_2}{dx_2} = \lambda$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} \equiv L - x_1 - x_2 = 0$$

Αρχικά βρίσκουμε την σχέση που συνδέει το κόστος της μονάδας 1, αντικαθιστώντας το κόστος x_1^{min} , με τη μεταβλητή λ και τη σταθερά μ_2 , ο πολλαπλασιαστής αυτός μας δείχνει την ελάχιστη ισχύ. Λύνουμε το

σύστημα και βρίσκουμε ότι *δεν λειτουργούν* όλες οι γεννήτριες στο ίδιο οριακό κόστος. Το κόστος της μονάδας 1 είναι στην υψηλότερη τιμή, γιατί ισχύει ότι $\frac{\partial L}{\partial \mu_2} \equiv x_1^{min} - x_1$ και $\mu_2 \geq 0$, στην επίλυση της σχέσης $\frac{\partial L}{\partial x_1} \equiv \frac{dc_1}{dx_1} - \lambda + \mu_2 = 0$ έχουμε $\frac{dc_1}{dx_1} = \lambda + \mu_2$ και έτσι το κόστος μειώνεται συναρτήσει του μ_2 .

3.3.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΙΣΩΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ (ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.3: Λαμβάνοντας υπόψη τη μονάδα με συναρτήσεις κόστους του Παραδείγματος 5.1, τα αποτελέσματα της οικονομικής κατανομής είναι τα ακόλουθα:

Unit	C_o (\$/h)	a (\$/MWh)	b (\$/(MW) ² h)	P_G^{min} (MW)	P_G^{max} (MW)
1	100	20	0.05	0	400
2	200	25	0.10	0	300

Case	P_D^{total} (MW)	P_{G1} (MW)	P_{G2} (MW)	IC_1 (\$/MWh)	IC_2 (\$/MWh)	λ (\$/MWh)	C (\$/h)
A-Ex.5.3	40	40	0 (min)	22	25	22	1.140
B-Ex.5.3	250	200	50	30	30	30	6.675
C-Ex.5.3	300	233.3	66.7	31.67	31.67	31.67	8.217
D-Ex.5.3	600	400 (max)	200	40	45	45	19.300

Ενώ τα όρια παραγωγής είναι:

$$0 \text{ MW} \leq P_1 \leq 400 \text{ MW}$$

$$0 \text{ MW} \leq P_2 \leq 300 \text{ MW}$$

$$P_D^{total} = 250 \text{ MW}$$

Το ωριαίο κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού σε \$/h είναι:

$$C_1(P_{G1})P_{G1}^2 = 100 + 20P_{G1} + 0.0025P_{G1}^2 \quad 0 \text{ MW} \leq P_{G1} \leq 400 \text{ MW}$$

$$C_2(P_{G2}) = 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2$$

$$0 \text{ MW} \leq P_{G2} \leq 300 \text{ MW}$$

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LANGRANGIAN:

$$L = 100 + 20P_{G1} + 0.05P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.10P_{G2}^2 - \lambda[P_1 + P_2 - P_D^{total}] - [\mu_1(P_1 - P_1^{max}) + \mu_3(P_2 - P_2^{max})] - [\mu_2(P_1 - P_1^{min}) + \mu_4(P_2 - P_2^{min})] = 100 + 20P_{G1} + 0.0025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 - \lambda[P_{G1} + P_{G2} - P_D^{total}] - \mu_1(P_{G1} - 400) - \mu_3(P_{G2} - 300) - \mu_2P_{G1} - \mu_4P_{G2}$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda - \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.10P_{G2} - \lambda - \mu_3 - \mu_4 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0$$

ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ ΟΠΟΥ $\mu_i = 0$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.10P_{G2} - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0$$

Κάνοντας τους υπολογισμούς όπως στην *Πρώτη Περίπτωση* τότε προκύπτει:

$$\lambda^* = 30 \text{€/MWh}$$

$$P_{G1} = 200 \text{MW}$$

$$P_{G2} = 50 \text{MW}$$

$$C_1(P_{G1}) = 5100 \text{€/h}$$

$$C_2(P_{G2}) = 1575 \text{€/h}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 6675 \text{€/h}$$

Οι τιμές ισχύων P_{G1} και P_{G2} είναι αποδεκτές γιατί είναι εντός των ορίων παραγωγής $0 \text{ MW} \leq P_1 \leq 400 \text{ MW}$, $0 \text{ MW} \leq P_2 \leq 300 \text{ MW}$. Έτσι έχουμε ότι $IC_1 = IC_2 = \lambda = 30 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$

$$P_D^{total} = 300 \text{MW}$$

$$C_1(P_{G1}) = 100 + 20P_{G1} + 0.05P_{G1}^2$$
$$400 \text{MW}$$

$$0 \text{ MW} \leq P_{G1} \leq$$

$$C_2(P_{G2}) = 200 + 25P_{G2} + 0.10P_{G2}^2$$

$$0 \text{ MW} \leq P_{G2} \leq 300 \text{MW}$$

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LANGRANGIAN:

$$L = 100 + 20P_{G1} + 0.05P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.10P_{G2}^2 - \lambda[P_{G1} + P_{G2} - P_D^{total}] - \mu_1(P_{G1} - 400) - \mu_3(P_{G2} - 300) - \mu_2P_{G1} - \mu_4P_{G2}$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda - \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.10P_{G2} - \lambda - \mu_3 - \mu_4 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0$$

ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ ΟΠΟΥ $\mu_i = 0$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G1} = 20(\lambda - 20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda - 25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0 \rightarrow P_{G1} + P_{G2} = 300 \rightarrow 20(\lambda - 20) + 10(\lambda - 25) = 300 \rightarrow 30\lambda - 650 = 300 \rightarrow \lambda^* = 31,67 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$P_{G1} = 20(\lambda - 20) = 233,3 \text{ MW}$$

$$P_{G2} = 10(\lambda - 25) = 66,7 \text{ MW}$$

$$C_1(P_{G1}) = 6129,89 \text{ €/h}$$

$$C_2(P_{G2}) = 2089,94 \text{ €/h}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 8219,83 \text{ €/h}$$

Οι τιμές ισχύων P_{G1} και P_{G2} είναι αποδεκτές γιατί είναι εντός των ορίων παραγωγής $0 \text{ MW} \leq P_1 \leq 400 \text{ MW}$, $0 \text{ MW} \leq P_2 \leq 300 \text{ MW}$. Έτσι έχουμε ότι $IC_1 = IC_2 = \lambda = 31,67 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$.

$$P_D^{total} = 600 \text{ MW}$$

$$C_1(P_{G1}) = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2$$

$$0 \text{ MW} \leq P_{G1} \leq 400 \text{ MW}$$

$$C_2(P_{G2}) = 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2$$

$$0 \text{ MW} \leq P_{G2} \leq 300 \text{ MW}$$

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LAGRANGIAN:

$$L = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 - \lambda[P_{G1} + P_{G2} - P_D^{total}] - \mu_1(P_{G1} - 400) - \mu_3(P_{G2} - 300) - \mu_2P_{G1} - \mu_4P_{G2}$$

ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ ΟΠΟΥ $\mu_i = 0$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G1} = 20(\lambda - 20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda - 25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0 \rightarrow P_{G1} + P_{G2} = 600 \rightarrow 20(\lambda - 20) + 10(\lambda - 25) = 600 \rightarrow 30\lambda - 650 = 600 \rightarrow \lambda^* = 41,67 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$P_{G1} = 20(\lambda - 20) = 433,4 \text{ MW}$$

$$P_{G2} = 10(\lambda - 25) = 166,7 \text{ MW}$$

Η $P_{G1} = 433,4 \text{ MW}$ απορρίπτεται γιατί είναι εκτός των ορίων παραγωγής. Αλλά απορρίπτεται και η $P_{G2} = 166,7 \text{ MW}$ γιατί ακόμα και $P_{G1} = P_{G1}^{max}$ δεν θα ισχύει η σχέση $P_D^{TOTAL} = P_{G1} - P_{G2}$. Άρα συνεχίζουμε στη Δεύτερη Δοκιμή.

ΔΕΥΤΕΡΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ $\mu_1 \neq 0$ $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0$, $P_{G1} = P_{G1}^{max} = 400 \text{ MW}$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0,05P_{G1} - \lambda - \mu_1 = 0 \rightarrow 400 * 0,05 = \lambda + \mu_1 - 20 \rightarrow \lambda = \mu_1 + 40$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0,1P_{G2} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda - 25) = 10(\mu_1 + 40 - 25) = 10(\mu_1 + 15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0 \rightarrow P_{G1} + P_{G2} = 600 \rightarrow 400 + 10\mu_1 + 150 = 600 \rightarrow \mu_1 &= \frac{50}{10} \rightarrow \mu_1 \\ &= 5 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \end{aligned}$$

$$P_{G2} = 10(\mu_1 + 15) = 10(5 + 15) = 200 \text{ MW}$$

$$\lambda = \mu_1 + 40 = 45 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Έτσι προκύπτει ότι $IC_1(P_{G1}) = \lambda + \mu_1 \leq \lambda$ είναι το κατώτερο όριο (lower bound), γιατί $P_{G1} = P_{G1}^{max}$.

ΤΡΙΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ $\mu_3 \neq 0$ $\mu_1 = \mu_2 = \mu_4 = 0$, $P_{G2} = P_{G2}^{max} = 300 \text{ MW}$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0,05P_{G1} - \lambda = 0 \rightarrow \lambda = 40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0,1P_{G2} - \lambda - \mu_3 = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda + \mu_3 - 25) = 10(40 - \mu_3 - 25) \rightarrow P_{G2} = 10(15 - \mu_3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0 \rightarrow P_{G1} + P_{G2} = 600 \rightarrow 400 - 10\mu_3 + 150 = 600 \rightarrow \mu_3 = -5 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$P_{G1} = 400 \text{ MW}$$

$$P_{G2} = 10(15 - \mu_3) = 150 + 50 = 200 \text{ MW}$$

$$\mu_3 = -5 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$\lambda = 40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Έτσι, έχουμε $IC_1(P_{G1}) = \lambda + \mu_1 \geq \lambda$ είναι το ανώτερο όριο (upper bound), $P_{G1} = P_{G1}^{max}$. Η μονάδα 2 λειτουργεί στην ελάχιστη παραγωγή της μονάδας εξόδου, και συναντά $\lambda < IC_2(P_{G2max})$, και η μονάδα 1

λειτουργεί στα όριά της. Άρα δεχόμαστε ότι η $P_{G2} = 200MW$, από την σχέση $P_D^{TOTAL} = P_{G1} + P_{G2} = 600MW$.

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 19300\text{€}/h$$

$$P_D^{total} = 40MW$$

$$C_1(P_{G1}) = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2$$

$$0 MW \leq P_{G1} \leq 400MW$$

$$C_2(P_{G2}) = 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2$$

$$0 MW \leq P_{G2} \leq 300MW$$

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ LAGRANGIAN:

$$L = 100 + 20 * P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 - \lambda[P_{G1} + P_{G2} - P_D^{total}] - \mu_1(P_{G1} - 400) - \mu_3(P_{G2} - 300) - \mu_2P_{G1} - \mu_4P_{G2}$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda - \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda - \mu_3 - \mu_4 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0$$

ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ ΟΠΟΥ $\mu_i = 0$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G1} = 20(\lambda - 20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda - 25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0 \rightarrow P_{G1} + P_{G2} = 40 \rightarrow 20(\lambda - 20) + 10(\lambda - 25) = 40 \rightarrow 30\lambda - 650 = 40 \rightarrow \lambda^* = 23 \frac{\text{€}}{MWh}$$

$$P_{G1} = 20(\lambda - 20) = 20 * (23 - 20) = 60MW$$

$$P_{G2} = 10(\lambda - 25) = 10 * (23 - 25) = -20MW$$

Η $0 MW \leq P_{G1}(60MW) \leq 400MW$ είναι αποδεκτή.

Η P_{G2} δεν είναι αποδεκτή, γιατί είναι, και $P_{G2} < 0$ και το άθροισμά τους δεν μας δίνει την τιμή του $P_D^{total} = 40MW$.

$$P_{G1} = 60MW$$

ΔΕΥΤΕΡΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ $\mu_4 \neq 0$ $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$, $P_{G2} = P_{G2}^{min} = 0MW$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda = 0 \rightarrow \lambda = 22 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda - \mu_3 = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(\lambda - \mu_4 - 25) = 10(22 - \mu_4 - 25) = 10(-\mu_4 - 3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow P_D^{TOTAL} - P_{G1} - P_{G2} = 0 \rightarrow 40 = 60 - 10\mu_4 - 30 \rightarrow \mu_4 = -1 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Η $P_{G2} + P_{G1} > 40$ άρα $P_{G1} = 60\text{MW}$ απορρίπτεται.

$$\lambda = 22 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = IC_1$$

ΤΡΙΤΗ ΔΟΚΙΜΗ: ΘΕΤΩ $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0, P_{G2} = 0\text{MW}$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - \lambda - \mu_1 = 0 \rightarrow P_{G1} = 20(\lambda - 20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.1P_{G2} - \lambda = 0 \rightarrow \lambda = 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$P_{G1} + P_{G2} = 40 \rightarrow P_{G1} = 40\text{MW}$$

$$\lambda = 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = IC_2 = \text{upper bound}$$

$$C_1(P_{G1}) = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 = 980 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

$$C_2(P_{G2}) = 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 = 200 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 1180 \text{€/h}$$

$P_{G2} = 0\text{MW}$ και $P_{G1} = 40\text{MW}$ είναι δεκτές τιμές της ισχύος γιατί είναι εντός των ορίων και ισχύει η σχέση $P_{G1} + P_{G2} = P_D^{total} = 40\text{MW}$. Επίσης, ισχύει ότι $IC_1(P_{G1}) = \lambda + \mu_4 \leq \lambda$ που είναι το κατώτερο όριο της ελάχιστης τιμής της μονάδας 2 ($P_{G2}^{min} = 0\text{MW}$) και έχουμε $IC_2(P_{G2}) = \lambda + \mu_2 \geq \lambda$.

3.4: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Σε αυτή την ενότητα, θα αναλύσουμε την οικονομική κατανομή αντιπροσωπεύοντας τις απώλειες κατά τη μεταφορά, αλλά εξαιρώντας τα όρια παραγωγής. Η εξέταση των απωλειών μεταφοράς στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής προσκομίζει δύο σημαντικές αλλαγές σε σχέση με τη βασική οικονομική κατανομή. Μια από αυτές είναι να αλλάξει ο στόχος της παραγωγής και η δεύτερη είναι να ανταποδώσει το οριακό κόστος την παροχή στην τοπική ζήτηση μη μοναδική σε όλο το δίκτυο μεταφοράς, που κυμαίνονται από ζυγό σε ζυγό.

Οι απώλειες μπορούν να ενσωματωθούν στην οικονομική κατανομή δια μέσου της τροποποιημένης εξίσωσης ισορροπίας της ισχύος:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D^{total} - P_{LOSS} = 0 \quad (5.47)$$

Από την (5.47), παρατηρούμε ότι οι απώλειες μεταφοράς τροποποιούν την εξίσωση ισορροπίας ισχύος σε δύο σημεία, το ένα με ελαφρώς αύξηση της καθαρής ζήτησης από την αξία των απωλειών (τυπικά 3 – 5% από τη ροή του συστήματος), και το δεύτερο σημείο με την εισαγωγή μιας μη γραμμικής που αντιπροσωπεύει τη λειτουργική σχέση ανάμεσα στις απώλειες P_{LOSS} , και τα διανύσματα της παραγωγής και της ζήτησης, P_G και P_D αντίστοιχα.

Από την εξίσωση ισορροπίας ισχύος με απώλειες (5.47), η *Lagrangian* γίνεται:

$$L(P_G, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) - \lambda [P_{G1} + P_{G2} - P_D^{total} - P_{LOSS}] \quad (5.48)$$

Οι Πρώτης Τάξης Αναγκαίες Συνθήκες Βέλτιστου:

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial P_{Gi}} = IC_i(P_{Gi}) - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial P_{Gi}} \Big|_{\delta} \right), \quad i = 1, \dots, n \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \lambda} = - \sum_{i=1}^n P_{Gi} + P_D^{total} + P_{LOSS}(P_G, P_D) = 0 \quad (5.50)$$

Παρατηρούμε από την (5.49) ότι η οι μονάδες παραγωγής δεν συνεργάζονται ανάλογα με τα διαφορικά κόστη (όπως στην περίπτωση χωρίς τις απώλειες μεταφοράς), αφού τα οριακά κόστη των μονάδων τώρα εξαρτώνται από την ευαισθησία των απωλειών σύμφωνα με τα επίπεδα παραγωγής. Σημειώνουμε ότι ο δείκτης s στην ευαισθησία των συντελεστών ευαισθησίας προσδιορίζει το χαλαρό ή το ζυγό ταλάντωσης s .

Το σύστημα από τις σχέσεις (5.49) και (5.50) μπορεί να επιλυθεί μόνο αριθμητικά, αφού η συνάρτηση απωλειών και η ευαισθησία των απωλειών είναι μη γραμμικές συναρτήσεις των επιπέδων παραγωγής, P_G . Γενικά, δεν είναι εφικτό να περιγραφούν αυτές οι μη γραμμικές συναρτήσεις σε μια σαφή μορφή, παρόλα αυτά, στην κλασική επίλυση της οικονομικής κατανομής, οι απώλειες εκπροσωπούνται από μια σαφή μορφή. Η ακριβέστερη και συνηθέστερη προσέγγιση είναι να υπολογίσουμε τις απώλειες και τις ευαισθησίες τους από τις εξισώσεις ροής φορτίου, οι οποίες καθορίζουν τις ποσότητες αυτές σιωπηρώς. Δείχνουμε τον τρόπο που βασίζεται η προσέγγιση ροής φορτίου.

Για λόγους απλότητας, θεωρούμε σταθερά τα μεγέθη τάσης σε όλο το δίκτυο. Οι εξισώσεις ροής φορτίου γίνονται:

$$P(\delta) = P_G - P_D \quad (5.51)$$

Οι $n - \text{διάστατοι}$ πίνακες P_G , P_D και $P(\delta)$ αντίστοιχα είναι η παραγωγή, η ζήτηση και η έγχυση, όπου ο πίνακας των εγχύσεων είναι μια μη γραμμική συνάρτηση από τη $(n - 1)$ διαστάσεων τάσης διάνυσμα με γωνία, δ η γωνία τάσης αναφοράς είναι στο μηδέν, χωρίς απώλεια της παραγωγής.

3.4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΜΓΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει *δύο μονάδες παραγωγής* P_1, P_2 με περιορισμένα όρια παραγωγής.

Unit	C_0 (\$/h)	a (\$/MWh)	b (\$/(MW) ² h)	P_G^{min} (MW)	P_G^{max} (MW)
1	100	20	0.05	0	400
2	200	25	0.10	0	300

Case	P_D^{total} (MW)	P_{G1} (MW)	P_{G2} (MW)	$P(\delta)$ (MW)	λ (\$/MWh)	C (\$/h)
1	250.25	366.7	133.35	0.025	76.67	15218.58

Το ωριαίο κόστος λειτουργίας δίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.

$$C_1(P_{G1}) = 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2$$

$$C_2 = 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2$$

Ενώ τα όρια παραγωγής είναι:

$$0 \text{ MW} \leq P_{G1} \leq 400 \text{ MW}$$

$$0 \text{ MW} \leq P_{G2} \leq 300 \text{ MW}$$

Οι *Απώλειες Μεταφοράς* είναι:

$$P_{LOSS}(P_1, P_2) = 0.5P_{G1} + 0.5P_{G2}$$

$$P_D^{total} = 250 \text{ MW}$$

Εξίσωση Ισορροπίας:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D^{total} - P_{LOSS} = 0 \rightarrow P_{G1} + P_{G2} - (0.5P_{G1} + 0.5P_{G2}) - 250 = 0 \rightarrow 0.5P_{G1} + 0.5P_{G2} = 250 \quad (5.47)$$

Συνάρτηση Lagrangian:

$$\begin{aligned}
 L(P_G, \lambda) &= \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) - \lambda * [P_{G1} + P_{G2} - P_D^{total} - P_{LOSS}] \rightarrow L(P_G, \lambda) \\
 &= 100 + 20P_{G1} + 0.025P_{G1}^2 + 200 + 25P_{G2} + 0.05P_{G2}^2 \\
 &\quad - \lambda[0.5P_{G1} + 0.5P_{G2} - 250] \quad (5.48)
 \end{aligned}$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G1}} = 0 \rightarrow 20 + 0.05P_{G1} - 0.5\lambda = 0 \rightarrow P_{G1} = 20(0.5\lambda - 20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{G2}} = 0 \rightarrow 25 + 0.05P_{G2} - 0.5 * \lambda = 0 \rightarrow P_{G2} = 10(0.5\lambda - 25)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 &\rightarrow P_D^{TOTAL} - 0.5P_{G1} - 0.5P_{G2} = 0 \rightarrow 250 = 0.5 * 20 * (0.5\lambda - 20) + 0.5 * 10 * (0.5\lambda - 25) \\
 &\rightarrow 250 = 5\lambda - 200 + 2.5\lambda - 125 \leftrightarrow 7.5\lambda = 575 \leftrightarrow \lambda = 76.67 \text{ €/MWh}
 \end{aligned}$$

$$P_{G1} = 20(0.5 * \lambda - 20) = 20(76.67 * 0.5 - 20) = 366.7 \rightarrow P_{G1} = 366.7 \text{ MW}$$

$$P_{G2} = 10(0.5 * \lambda - 25) = 10(0.5 * 76.67 - 25) \rightarrow P_{G2} = 133.35 \text{ MW}$$

Υπολογίζουμε τις Απώλειες Μεταφορών, για να αποδείξουμε στη συνέχεια αν ισχύει η Εξίσωση Ισορροπίας:

$$P_{LOSS}(P_1, P_2) = 0.5P_{G1} + 0.5P_{G2} = 0.5 * 366.7 + 0.5 * 133.35 = 250.025 \text{ MW}$$

Έτσι επαληθεύεται η Εξίσωση Ισορροπίας (5.47).

$$0.5P_{G1} + 0.5P_{G2} = 250 \rightarrow 250.025 \neq 250$$

Τα n -διάστατα διανύσματα P_G , P_D , και $P(\delta)$ είναι η παραγωγή, η ζήτηση, και η έγχυση, αντίστοιχα, όπου ο φορέας των εγχύσεων είναι μια μη γραμμική συνάρτηση, από το $(n-1)$ -διάνυσμα διαστάσεων γωνίας τάσης, δ (η αναφορά γωνία τάσης ρυθμίζεται στο μηδέν, χωρίς βλάβη της γενικότητας). Η Εξίσωση Ροής Φορτίου δίνεται παρακάτω:

$$P(\delta) = P_G - P_D^{total} = 250.025 - 250 \rightarrow P(\delta) = 0.025 \text{ MW}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 = 10795.72 + 4422.86 = 15218.58 (\$/h)$$

3.5: ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.5.1: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΙΣΟΤΗΤΑΣ

Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τρεις (3) σταθμούς που παράγουν ισχύ P_1 , P_2 , P_3 και ωριαία κατανάλωση θερμότητας που δίνεται από τις εξισώσεις:

$$H_1(P_1) = 60 + P_1 + 2.5 * 10^{-4} P_1^2 \quad (\text{Fuel cost } C1 = 20\text{€/Gcal})$$

$$H_2(P_2) = 100 + 3P_2 + 5 * 10^{-4} P_2^2 \quad (\text{Fuel cost } C2 = 10\text{€/Gcal})$$

$$H_3(P_3) = 50 + 0.5P_3 + 5 * 10^{-4} P_3^2 \quad (\text{Fuel cost } C3 = 20\text{€/Gcal})$$

Το σύστημα πρέπει να καλύψει τη συνολική ζήτηση ισχύος (demand) $P_D=4500$ MW. Να υπολογιστούν οι τιμές των P_1 , P_2 , P_3 προκειμένου να ελαχιστοποιείται το συνολικό ωριαίο κόστος λειτουργίας F_{TOTAL} (το οποίο και να υπολογιστεί).

Επειδή $C_i = H_i C_i$, ($i=1,2,3$) το ωριαίο κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού σε €/h γίνεται:

$$C_1(P_1) = 1200 + 20P_1 + 0.005 * P_1^2$$

$$C_2(P_2) = 1000 + 30 * P_2 + 0.005 * P_2^2$$

$$C_3(P_3) = 1000 + 10 * P_3 + 0.010 * P_3^2$$

$$C_{\text{TOTAL}} = C_1 + C_2 + C_3 = 1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2 + 1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2 + 1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2$$

Η συνάρτηση *Lagrange* του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} L(P_1, P_2, P_3) &= \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \lambda \left[P_D - \sum_{i=1}^N P_i \right] \\ &= (1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2) + (1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2) \\ &\quad + (1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2) + \lambda [P_D - P_1 - P_2 - P_3] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = 0 \rightarrow 20 + 0.005 * 2P_1 - \lambda = 0 \rightarrow P_1 = \frac{\lambda - 20}{0.01} \rightarrow P_1 = 100(\lambda - 20) \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_2} = 0 \rightarrow 30 + 0.005 * 2P_2 - \lambda = 0 \rightarrow P_2 = \frac{\lambda - 30}{0.01} \rightarrow P_2 = 100(\lambda - 30) \quad (2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_3} = 0 \rightarrow 10 + 0.010 * 2P_3 - \lambda = 0 \rightarrow P_3 = \frac{\lambda - 10}{0.02} \rightarrow P_3 = 50(\lambda - 10) \quad (3)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_D = 4500 \rightarrow 100(\lambda - 20) + 100(\lambda - 30) + 50(\lambda - 10) = 4500 \rightarrow 250\lambda - 5500 = 4500 \rightarrow \lambda^* = 40\text{€/MWh} \quad (4)$$

$$P_1 = 100(\lambda - 20) = 2000 \text{ MW}$$

$$P_2 = 100(\lambda - 30) = 1000 \text{ MW}$$

$$P_3 = 50(\lambda - 10) = 1500 \text{ MW}$$

$$\lambda^* = 40 \text{ €/MWh}$$

$$P_1 = 2000 \text{ MW}$$

$$P_2 = 1000 \text{ MW}$$

$$P_3 = 1500 \text{ MW}$$

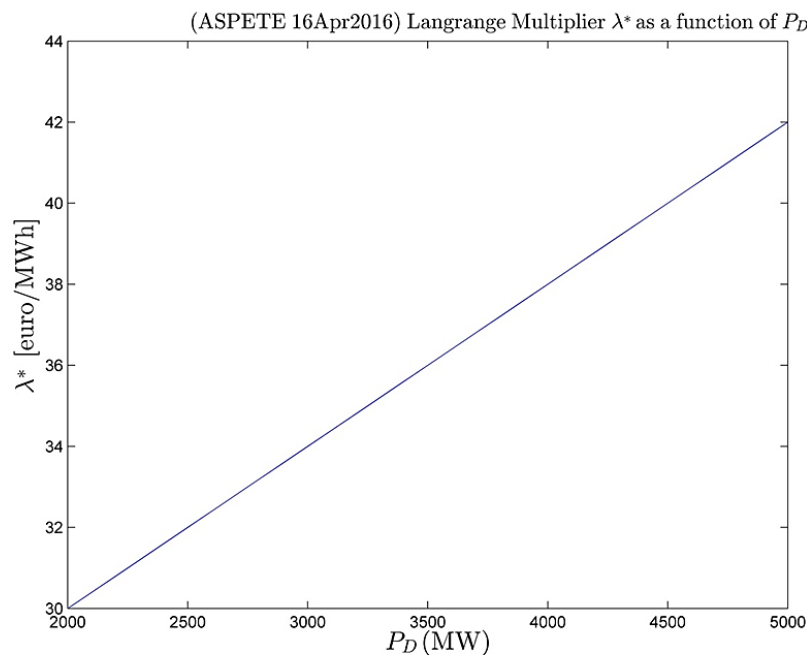
$$C_1(P_1) = 1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2 = 61200 \text{ €/h}$$

$$C_2(P_2) = 1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2 = 36000 \text{ €/h}$$

$$C_3(P_3) = 1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2 = 38500 \text{ €/h}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 + C_3 = 61200 + 36000 + 38500 = 135700 \text{ €/h}$$

ΣΧΟΛΙΟ: το κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού θεωρήθηκε ότι εξαρτάται αποκλειστικά από την παραγόμενη ισχύ του σταθμού. Επίσης, δεν ελήφθησαν υπόψη τυχόν περιορισμοί στην παραγωγή ισχύος.



Σε αυτόν το βρόχο μεταβάλλεται γραμμικά το P_Demand ανάμεσα στις τιμές που αναφέραμε, δηλαδή 2000 με 5000 MW με ρυθμό 100W, και τις αποθηκεύει στη μεταβλητή $P_Demand_save(i)$ για να περαστούν έπειτα στη γραφική παράσταση. Υπολογίζουμε τις τιμές του λ^* για κάθε τιμή ζήτησης αντίστοιχα.

Η Συνάρτηση $\lambda = f(P_D)$ είναι γραμμική, γιατί εξαρτάται από τη σχέση $\sum_{i=1}^N C_i(P_i) = P_D$, η P_D κυμαίνεται ανάμεσα στα 2000 με 5000 MW με ρυθμό 100W, και από τη σχέση $\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \rightarrow \frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} - \lambda = 0$ ($i=1,2,\dots,N$), προκύπτει ότι η συνάρτηση είναι της μορφής $\mathbf{y} = \mathbf{ax}$. Η σχέση $P_1 + P_2 + P_3 = P_D$ βοηθάει στην επίλυση της άσκησης, γιατί παρατηρούμε ότι στο P_i ότι έχουμε όπου $\mathbf{y} = \lambda$, και όπου $\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + P_D$. Έτσι βρίσκουμε τις τιμές του λ^* ανάλογα με την ισχύ που έχουμε εκείνη τη στιγμή, και από τη σχέση (4) προέκυψε η παραπάνω γραφική παράσταση.

3.5.2: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΙΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΝΙΣΟΤΗΤΑΣ

Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει **τρεις (3)** σταθμούς που παράγουν ισχύ P_1 , P_2 , P_3 και ωριαία κατανάλωση θερμότητας που δίνεται από τις εξισώσεις:

$$H_1(P_1) = 60 + P_1 + 2.5 * 10^{-4} P_1^2 \quad \text{Fuel cost } C_1 = 20 \text{ €/Gcal}$$

$$H_2(P_2) = 100 + 3P_2 + 5 * 10^{-4} P_2^2 \quad \text{Fuel cost } C_2 = 10 \text{ €/Gcal}$$

$$H_3(P_3) = 50 + 0.5P_3 + 5 * 10^{-4} P_3^2 \quad \text{Fuel cost } C_3 = 20 \text{ €/Gcal}$$

Ενώ οι λειτουργικοί περιορισμοί των σταθμών είναι:

$$1000 \text{ MW} \leq P_1 \leq 5000 \text{ MW}$$

$$100 \text{ MW} \leq P_2 \leq 900 \text{ MW}$$

$$2000 \text{ MW} \leq P_3 \leq 3000 \text{ MW}$$

Το σύστημα πρέπει να καλύψει συνολική ζήτηση ισχύος $P_D = 4500 \text{ MW}$. Να υπολογιστούν οι τιμές των P_1 , P_2 , P_3 προκειμένου να ελαχιστοποιείται το συνολικό ωριαίο κόστος λειτουργίας F_{TOTAL} (το οποίο και να υπολογιστεί).

Επειδή $C_i = H_i C_i$, ($i=1,2,3$) το ωριαίο κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού σε €/h γίνεται:

$$C_1(P_1) = 1200 + 20 * P_1 + 0.005 * P_1^2$$

$$C_2(P_2) = 1000 + 30 * P_2 + 0.005 * P_2^2$$

$$C_3(P_3) = 1000 + 10 * P_3 + 0.010 * P_3^2$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 + C_3$$

Σχηματίζοντας τη συνάρτηση *Lagrange* και αφού συνεχίσουμε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην 1^η Περίπτωση (Οικονομική Κατανομή Φορτίου Με Περιορισμούς Ισότητας Με Τρεις Σταθμούς Παράγωγης) προκύπτει ότι:

$$\lambda = 40 \text{ €/MWh}, \quad P_1 = 2000 \text{ MW}, \quad P_2 = 1000 \text{ MW}, \quad P_3 = 1500 \text{ MW}$$

Οι τιμές P_2 και P_3 που προέκυψαν είναι εκτός των λειτουργικών ορίων των σταθμών. Για το λόγο αυτό, οι υπολογισμοί πρέπει να επαναληφθούν με διαφορετική τιμή λ . Μία λύση για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η εξής:

$$P_2' = P_{2max} = 900 \text{ MW}$$

$$P_3' = P_{3min} = 2000 \text{ MW}$$

$$P_1' = P_D - (P_{2max} + P_{3min}) = 4500 - 2900 \rightarrow P_1' = 1600 \text{ MW}$$

$$C_1(P_1) = 1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2 \rightarrow C_1(P_1) = 46000 \text{ €/h}$$

$$C_2(P_2) = 1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2 \rightarrow C_2(P_2) = \mathbf{32050 \text{ €/h}}$$

$$C_3(P_3) = 1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2 \rightarrow C_3(P_3) = \mathbf{61000 \text{ €/h}}$$

$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 + C_3 = \mathbf{139050 \text{ €/h}}$, υψηλότερο από της 1^{ης} Περίπτωσης (Οικονομική Κατανομή Φορτίου Με Περιορισμούς Ισότητας Με Τρεις Σταθμούς Παράγωγης).

3.5.3: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΙΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΝΙΣΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει **τρεις (3) σταθμούς** που παράγουν ισχύ P_1, P_2, P_3 και ωριαία κατανάλωση θερμότητας που δίνεται από τις εξισώσεις:

$$H_1(P_1) = 60 + P_1 + 2.5 * 10^{-4}P_1^2 \quad \text{Fuel cost } C_1=20 \text{ €/Gcal}$$

$$H_2(P_2) = 100 + 3P_2 + 5 * 10^{-4}P_2^2 \quad \text{Fuel cost } C_2=10 \text{ €/Gcal}$$

$$H_3(P_3) = 50 + 0.5P_3 + 5 * 10^{-4}P_3^2 \quad \text{Fuel cost } C_3=20 \text{ €/Gcal}$$

Ενώ οι λειτουργικοί περιορισμοί των σταθμών είναι:

$$1000 \text{ MW} \leq P_1 \leq 5000 \text{ MW}$$

$$100 \text{ MW} \leq P_2 \leq 900 \text{ MW}$$

$$2000 \text{ MW} \leq P_3 \leq 3000 \text{ MW}$$

Τέλος, το σύστημα παρουσιάζει *απώλειες μεταφοράς* που εξαρτώνται από τις παραγόμενες ισχύεις των μονάδων 1 και 2 και περιγράφονται από τη συνάρτηση:

$$P_{LOSS}(P_1, P_2) = 0.5P_1 + 0.5P_2$$

Το σύστημα πρέπει να καλύψει συνολική ζήτηση ισχύος (demand) $P_D = \mathbf{4500 \text{ MW}}$ (και τις απώλειες P_{LOSS}). Να υπολογιστούν οι τιμές των P_1, P_2, P_3 προκειμένου να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας F_{TOTAL} (το οποί και να υπολογιστεί).

Επειδή $F_i = H_i C_i$, ($i=1,2,3$) το ωριαίο κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού σε €/h γίνεται:

$$C_1(P_1) = 1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2$$

$$C_2(P_2) = 1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2$$

$$C_3(P_3) = 1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\begin{aligned} L(P_1, P_2, P_3) &= \sum_{i=1}^3 C_i(P_i) + \lambda \left[P_D + P_{LOSS} - \sum_{i=1}^3 P_i \right] = \\ &= (1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2) + (1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2) + (1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2) \\ &\quad + \lambda [4500 + 0.5P_1 + 0.5P_2 - P_1 - P_2 - P_3] \end{aligned}$$

Πρέπει:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} + \lambda \left(\frac{\partial P_L}{\partial P_i} - 1 \right) = 0 \leftrightarrow \frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} = \lambda \quad (i=1,2,3)$$

Όμως

$$\frac{\partial C_1(P_1)}{\partial P_1} = 20 + 0.010P_1 \quad \text{και} \quad \frac{\partial P_L}{\partial P_1} = 0,5 \rightarrow 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1} = 0,5 \rightarrow \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_1}} = 2$$

$$\frac{\partial C_2(P_2)}{\partial P_2} = 30 + 0.010P_2 \quad \text{και} \quad \frac{\partial P_L}{\partial P_2} = 0,5 \rightarrow 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2} = 0,5 \rightarrow \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2}} = 2$$

$$\frac{\partial C_3(P_3)}{\partial P_3} = 10 + 0.020P_2 \quad \text{και} \quad \frac{\partial P_L}{\partial P_2} = 0 \rightarrow 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2} = 1 \rightarrow \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_2}} = 1$$

Άρα,

$$(20 + 0.010P_1) * 2 = \lambda \rightarrow P_1 = \frac{\lambda - 40}{0,02} \rightarrow P_1 = 50(\lambda - 40)$$

$$(30 + 0.010P_2) * 2 = \lambda \rightarrow P_2 = \frac{\lambda - 60}{0,02} \rightarrow P_2 = 50(\lambda - 60)$$

$$(10 + 0.020P_2) * 1 = \lambda \rightarrow P_3 = \frac{\lambda - 10}{0,02} \rightarrow P_3 = 50(\lambda - 10)$$

Πρέπει να ισχύει ότι:

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_D + P_{LOSS} = 4500 + 0.5P_1 + 0.5P_2 \rightarrow 0.5P_1 + 0.5P_2 + P_3 = 4500 \rightarrow 25(\lambda - 40) + 25(\lambda - 60) + 50(\lambda - 10) = 4500 \rightarrow \lambda = 75 \text{ €/MWh}$$

Άρα,

$$P_1 = 50(\lambda - 40) = 1750 \text{ MW}$$

$$P_2 = 50(\lambda - 60) = 750 \text{ MW}$$

$$P_3 = 50(\lambda - 10) = 3250 \text{ MW}$$

Όλες οι τιμές είναι εντός των λειτουργικών ορίων.

$$P_{LOSS}(P_1, P_2) = 0.5P_1 + 0.5P_2 = 1250 \text{ MW}$$

$$C_1(P_1) = 1200 + 20P_1 + 0.005P_1^2 = 51512.50 \text{ €/h}$$

$$C_2(P_2) = 1000 + 30P_2 + 0.005P_2^2 = 26312.50 \text{ €/h}$$

$$C_3(P_3) = 1000 + 10P_3 + 0.010P_3^2 = 139125.00 \text{ €/h}$$

$$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 + C_3 = 216950.00 \text{ €/h}$$

4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ

4.1: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πολλά και χρήσιμα προβλήματα ενός μηχανικού ηλεκτρικής ενεργείας διατυπώνονται και επιλύονται σαν *προβλήματα μαθηματικής βελτιστοποίησης*, όπως πρόβλημα κατανομής φορτίου, υδροθερμικού σχεδιασμού, μακροχρόνιου σχεδιασμού και ένταξης μονάδων παράγωγης.

Παραπάνω μελετήσαμε την επιρροή διαφορετικών περιορισμών σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάσαμε λεπτομερώς, δώδεκα περιπτώσεις των μοντέλων βέλτιστης κατανομής φορτίου, των οποίων τα αποτελέσματα μπορούν να αντικατασταθούν από τον αναγνώστη.

Η *Πρώτη Περίπτωση* που εξετάζει την *Οικονομική Κατανομή Φορτίου Με Περιορισμούς Ισότητας*, μας δίνει ως στόχο μια και μόνο τιμή μπορούμε να βασιστούμε στους απλούς υπολογισμούς.

Η *Δεύτερη Περίπτωση* που μελετάει την *Οικονομική Κατανομή Φορτίου Με Περιορισμούς Ισότητας Και Περιορισμούς Ανισότητας*, σε αυτή την περίπτωση έχουμε όρια παραγωγής. Μελετώντας την περίπτωση αυτή κατανοούμε τις επιπτώσεις στις διάφορες μονάδες. Αυτό μπορεί να επηρεάσει όλες τις συμπεριλαμβανόμενες μονάδες παραγωγής. Εξαιτίας των περιορισμών αυτών, η πιο αποδοτική μονάδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στα όριά της και η λιγότερο αποτελεσματική μονάδα, πρέπει να γίνει πιο αποδοτική. Έτσι οδηγούμαστε σε ένα υψηλότερο κόστος και σε μια υψηλότερη τιμή.

Η *Τρίτη Περίπτωση* η οποία είναι *Οικονομική Κατανομή Φορτίου Με Περιορισμούς Ισότητας Και Περιορισμούς Ανισότητας Και Απώλειες Μεταφοράς*, οι απώλειες κατά τη μεταφορά συνυπολογίζονται. Έτσι καταλαβαίνουμε, ότι εξαιτίας αυτών των απωλειών, μια υψηλότερη απόδοση ισχύος απαιτείται για να ανταποκριθεί επαρκώς στην υψηλότερη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

4.2: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ

4.2.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

Η ροή της ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς είναι συνήθως οριοθετημένη είτε από θερμικές είτε από υποθέσεις σταθερότητας. Τα θερμικά όρια επιβάλλονται από την ικανότητα των αγωγών της γραμμής να διασκορπίσουν τη θερμότητα που δημιουργείται από τις απώλειες I^2R . Τα Όρια Της Σταθερότητας επιβάλλονται στη ροή της ισχύος από την ικανότητα του συστήματος να ανακτά συγχρονισμό μετά από ένα σημαντικό σφάλμα, όπως το βραχυκύκλωμα στη γραμμή. Αν και τα δίκτυα συνεργάζονται και σχεδιάζονται έτσι ώστε κανένα από τα όρια της γραμμής μεταφοράς να είναι ενεργό, ωστόσο είναι απίθανο για τα όρια της γραμμής μεταφοράς να επιτεθούν υπό ασυνήθη φορτία ή απρόβλεπτα φορτία. Σε τέτοιες περιπτώσεις η οικονομική κατανομή πρέπει να επιλυθεί ανάλογα με τους περιορισμούς της ροής του φορτίου της γραμμής.

Για να προσδιορίσουμε τον επεξηγηματικό σκοπό, ο οποίος διατηρεί την απλότητα, σκεφτόμαστε μια οικονομική κατανομή χωρίς απώλειες και χωρίς όρια παραγωγής, αλλά συμπεριλαμβάνοντας τα όρια της γραμμής μεταφοράς σε μια από τις γραμμές του συστήματος. Υπολογίζουμε επίσης, ότι η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας στη γραμμή της οποίας η παραγωγή οριοθετείται, εκφράζεται γραμμικά, δηλαδή:

$$P_F = \sum_{i=1}^n \beta_i (P_{Gi} - P_{Di}) = \beta^T (P_G - P_D) \quad (5.71)$$

Το αποτέλεσμα του προβλήματος της οικονομικής κατανομής περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής (5.1), έτσι ώστε η κατάσταση ισορροπίας της δύναμης:

$$\sum_{i=1}^n (P_{Gi} - P_{Di}) = 0 \quad (5.72)$$

Και τα όρια παραγωγής συμπεριλαμβανόμενα στην μονή γραμμή με οριοθετημένη παραγωγή:

$$-P_F^{max} \leq \beta^T (P_G - P_D) \leq P_F^{max} \quad (5.73)$$

Παρατηρούμε ότι μόνο ένας από τους δύο παραπάνω περιορισμούς μπορεί να γίνει δεσμευτικός. Οι πρώτες αναγκαίες συνθήκες βέλτιστου προέρχονται από την ίδια *Lagrangian* ακολουθία όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε δύο ισωτικούς περιορισμούς εκτός από ένα σημείο ισορροπίας της ενέργειας και ένα από τα ακραία όρια της γραμμής από τις ανισότητες (5.73).

$$IC_i(P_{Gi}) = \lambda + \gamma \beta_i, \quad \forall i \quad (5.74)$$

Όπου γ είναι ο πολλαπλασιαστής *Lagrange* ο οποίος σχετίζεται με το ενεργό όριο ροής ισχύος σε ένα από τους δύο περιορισμούς της (5.73).

4.2.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

Σε αυτή την περίπτωση, σκεφτόμαστε την οικονομική κατανομή με όρια παραγωγής, με απώλειες και όρια παραγόμενης ισχύος. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα απλοποιημένο παράδειγμα από το μοντέλο της βέλτιστης ροής φορτίου (*optimal power flow OPF*), στο οποίο τα *μεγέθη τάσης και αντιδραστικές δυνάμεις των εγχύσεων* είναι μεταβλητές αποφάσεις.

Η συγκεκριμένη περίπτωση της *βέλτιστης ροής φορτίου* (συμβολίζεται OPF-ED), αποτελείται από την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (5.75), το οποίο υπακούει στα όρια παραγωγής (5.76), στους περιορισμούς ροής φορτίου (5.77) και στα όρια παραγωγής ισχύος για όλες τις γραμμές, δηλαδή:

$$\text{minimize}_{P_G, \delta} \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (5.75)$$

$$-P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \quad (5.76)$$

$$P_G - P_D = P(\delta) \quad (5.77)$$

$$|P_F(\delta)| \leq P_F^{\max} \quad (5.78)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις της οικονομικής κατανομής υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις από την παραπάνω διατύπωση.

Οι πρώτης Τάξης Αναγκαίες συνθήκες του προβλήματος (5.75) – (5.78) χαρακτηρίζονται από:

$$\lambda_i = \frac{\partial C}{\partial P_{Di}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.79)$$

Όπου λ_i είναι οι πολλαπλασιαστές *Lagrangian* που σχετίζονται με τη ροή του φορτίου (5.77).

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι σταθερές διμερείς συμβάσεις ενσωματώνονται ευκολότερα στη βέλτιστη ροή φορτίου. Κάθε σταθερή διμερής συμφωνία καταλήγει σε ένα περιορισμό, αναγκάζοντας μια μονάδα να παράγει μια προ καθορισμένη ποσότητα και μια απαίτηση να καταναλώνεται μια τέτοια ποσότητα, ανεξάρτητα από το κόστος της μονάδας που ασχολείται με την διμερή σύμβαση της εταιρείας.

4.2.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (UNIT COMMITMENT UC)

Στη διατύπωση της *Οικονομικής Κατανομής*, σκεφτόμαστε ότι όλες οι μονάδες παραγωγής είναι *συνδεδεμένες* στο δίκτυο και είναι έτοιμες για την *παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας*. Παρόλα αυτά, οι μονάδες μπορούν είτε να είναι *συνδεδεμένες* είτε να βρίσκονται *εκτός σύνδεσης*. Η *επέκταση* από το πρόβλημα της *οικονομικής κατανομής* προς τις *μονάδες* που είναι ικανές να *ξεκινήσουν* και να *κλείσουν* κατά την *πάροδο* του χρόνου εκφράζεται σαν *αλγόριθμος ένταξης μονάδων παραγωγής (Unit Commitment UC)*. Το παρακάτω παράδειγμα χαρακτηρίζει τη δεσμευμένη μονάδα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.9:

Δεσμευμένη Μονάδα (UC)

Λαμβάνουμε υπόψη τα δεδομένα του παραδείγματος της 1^{ης} Περίπτωσης χωρίς απώλειες και χωρίς όρια χωρητικότητας, αλλά με όρια παραγωγής.

Unit	C_0 (\$/h)	a (\$/MWh)	b (\$/(MW) ² h)	P_G^{min} (MW)	P_G^{max} (MW)
1	100	20	0.05	0	400
2	200	25	0.10	0	300

Αναλύουμε όλους τους πιθανούς διαφορετικούς συνδυασμούς από τις μονάδες που είναι εντός και εκτός παραγωγής, δηλαδή (1,0), (0,1), και (1,1), οι οποίοι δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα της οικονομικής κατανομής:

Case	P_D	P_{G1}	P_{G2}	λ	C (\$/MWh)
(1, 0)	40	40.00	0.00	22.00	940.0
(0, 1)	40	0.00	40.00	29.00	1280.0
(1, 1)	40	40.00	0.00	22.00	1140.0
(1, 0)	250	250.00	0.00	32.50	6662.5
(0, 1)	250	0.00	250.00	50.00	9575.0
(1, 1)	250	200.00	50.00	30.00	6675.0
(1, 0)	300	300.00	0.00	35.00	8350.0
(0, 1)	300	0.00	300.00	55.00	12200.0
(1, 1)	300	233.33	66.67	31.67	8216.7

Η συγκεκριμένη περίπτωση της οικονομικής κατανομής αναλύεται ανάμεσα στην *εκφρασμένη στατική* της οικονομικής κατανομής αφού θεωρείται *μια ενιαία χρονική περίοδος*. Χρησιμοποιώντας τη διατύπωση της *βέλτιστης ροής φορτίου* (5.75) μέχρι (5.78) το πρόβλημα λύνεται εύκολα. Σε αυτό το τέλος, καταλήγουν τα όρια της παραγωγής της μονάδας i , P_{Gi}^{min} και P_{Gi}^{max} , και πολλαπλασιάζονται με *μια δυαδική μεταβλητή* u_i . Η οικονομική κατάσταση της μονάδας παραγωγής εκφράζεται από το ζεύγος (P_{Gi}, u_i) , και η στατική οικονομική κατανομή παίρνει τη μορφή:

$$\text{minimize}_{u, P_G, \delta} \sum_{i=1}^n C_i(u_i, P_{Gi}) \quad (5.80)$$

$$u_i P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq u_i P_{Gi}^{max}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.81)$$

$$P_G - P_D = P(\delta) \quad (5.82)$$

$$|P_F(\delta)| \leq P_F^{max} \quad (5.83)$$

Σε αυτή την περίπτωση, το κόστος της μονάδας εκφράζεται ως εξής:

$$C_i(\mathbf{u}_i, P_{Gi}) = \mathbf{u}_i C_{0i} + \mathbf{a}_i P_{Gi} + \frac{1}{2} \mathbf{b}_i P_{Gi}^2 \quad (5.84)$$

Οι ακόλουθες παρατηρήσεις είναι σχετικές:

1. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης αποτελούνται από την τριάδα των διανυσμάτων $(\mathbf{u}_i, P_{Gi}, \delta)$, η οποία συμπεριλαμβάνει συνεχείς δυαδικές μεταβλητές
2. Το πρόβλημα (5.80) – (5.83) είναι ένα γενικά ένας μη γραμμικός προγραμματισμός ακεραίου αριθμού, το οποίο είναι δύσκολο προς επίλυση. Παρόλα αυτά, αν οι συναρτήσεις είναι γραμμικοποιημένες, το αποτέλεσμα μικτού ακεραίου γραμμικού προβλήματος γίνεται πολύ πιο προσιτό.
3. Αν μια μονάδα παραγωγής είναι εκτός γραμμής ($u_i = 0$), τα όρια παραγωγής της είναι μηδέν (5.81). Αυτό υποδηλώνει ότι $P_{Gi} = \mathbf{0}$ και $C_i(\mathbf{u}_i, P_{Gi}) = \mathbf{0}$
4. Το κόστος από μια μονάδα παραγωγής μπορεί να εκφραστεί ως εξής:
 $C_i(\mathbf{u}_i, P_{Gi}) = \mathbf{u}_i C_{0i} + C_{Vi}(P_{Gi})$, όπου $C_{Vi}(P_{Gi})$ είναι μια κυρτή συνάρτηση που εξαρτάται αποκλειστικά από P_{Gi} .

Γενικότερα, η οικονομική κατανομή είναι ένα πολύ περίοδο πρόβλημα προγραμματισμού που πρέπει να αναδιατάσει τους περιορισμούς που οριοθετούν το όριο παραγωγής από οποιαδήποτε μονάδα παραγωγής ανάμεσα σε δύο διαδοχικά χρονικά διαστήματα. Η οικονομική κατανομή μπορεί να περιλαμβάνει ελάχιστα πάνω και κάτω χρόνους, οι οποίοι επιβάλουν το γεγονός ότι οι θερμικές μονάδες αν ξεκινήσουν πρέπει να παραμείνουν στη γραμμή για ένα συγκεκριμένο αριθμό περιόδων, και αν σβήσουν πρέπει να παραμείνουν για ένα δοθέντα αριθμό περιόδων. Η διαδικασία ξεκινήματος των μονάδων παραγωγής συμπεριλαμβάνει ένα επιπλέον κόστος που σχετίζεται με το καύσιμο που καταναλώνεται για να οδηγήσει το λέβητα στη θερμοκρασία λειτουργίας του.

Η πολύ περίοδος της διατύπωσης οικονομικής κατανομής περιγράφεται παρακάτω:

$$\text{Minimize}_{P_{Gj,t}, \forall j, \forall t; \mathbf{u}_{j,t}, \forall j, \forall t}$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n C_{j,t}(\mathbf{u}_{j,t}, P_{Gj,t}) + C_{j,t}^{SU} \quad (5.85)$$

$$C_{j,t}^{SU} \geq C_j^{SU}(\mathbf{u}_{j,t} - \mathbf{u}_{j,t-1}) \quad \forall j, \forall t \quad (5.86)$$

$$C_{j,t}^{SU} \geq 0 \quad \forall j, \forall t \quad (5.87)$$

$$\mathbf{u}_{j,t} P_{Gj}^{\min} \leq P_{Gj} \leq \mathbf{u}_{j,t} P_{Gj}^{\max} \quad \forall j, \forall t \quad (5.88)$$

$$P_{Gj,t-1} - P_{Gj,t} \leq R_{Gj}^{\text{down}} \quad \forall j, \forall t \quad (5.89)$$

$$P_{Gj,t} - P_{Gj,t-1} \leq R_{Gj}^{\text{up}} \quad \forall j, \forall t \quad (5.90)$$

$$P_{Gj,t} = P_{Dt} \quad \forall t \quad (5.91)$$

$$\mathbf{u}_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall t \quad (5.92)$$

Όπου $C_{j,t}(u_{j,t}, P_{Gj,t})$ έχουμε το κόστος παραγωγής της συνάρτησης από τη μονάδα j ,
 $C_{j,t}^{SU}$ είναι το κόστος εκκίνησης που προκύπτει από τη μονάδα j τη χρονική περίοδο t (άγνωστη)
 C_j^{SU} είναι το σταθερό κόστος εκκίνησης από τη μονάδα j
 $P_{Gj,t}$ το επίπεδο παραγωγής από τη μονάδα j στη διάρκεια της περιόδου t (άγνωστη)
 P_{Gj}^{min} είναι η ελάχιστη ισχύς της μονάδας j , P_{Gj}^{max} η χωρητικότητα από τη μονάδα j (γνωστή),
 P_{Dt} η ζήτηση κατά τη διάρκεια της περιόδου t , R_{Gj}^{down} η κατώτερη βαθμίδα της μονάδας j (γνωστή)
 R_{Gj}^{up} είναι η ανώτερη κατώτερη βαθμίδα της μονάδας j (γνωστή),
 $u_{j,t}$ είναι η δυαδική μεταβλητή η οποία είναι ανάλογη στο 1, αν η μονάδα j είναι εντός γραμμής στη διάρκεια της χρονικής περιόδου t , και είναι μηδέν σε άλλη περίπτωση

n είναι ο αριθμός των μονάδων παραγωγής,
 $u_{j,0}$ και P_{Gj0} είναι οι τιμές των ανοιχτών και κλειστών μεταβλητών καθώς και της παραγώμενης ισχύος

Υπολογίζουμε ότι $R_{Gj}^{up} \geq P_{Gj}^{min}$ και $R_{Gj}^{down} \geq P_{Gj}^{min}$ για οποιαδήποτε μονάδα παραγωγής j . Αυτό συμβαίνει όταν η μία μονάδα είναι ανοιχτή, έχει ικανότητα αναδιάταξης για να φτάσει το ελάχιστο επίπεδο παραγωγής σε μια χρονική περίοδο.

Οι αποθεματικοί περιορισμοί εγγυώνται ότι ένα συγκεκριμένο επίπεδο ασφάλειας μπορεί να ενσωματωθεί στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής, όπως:

$$\sum_{i=1}^n u_{jt} P_{Gj}^{max} \geq P_{Dt} + P_{Rt} \quad \forall t \quad (5.93)$$

P_{Rt} ένα δωθέν επίπεδο. Αυτή η ανισότητα επιβεβαιώνει ότι οποιοδήποτε χρόνο t υπάρχει μια προγραμματισμένη ικανότητα παραγωγής για να μπορέσει να εξισορροπήσει το φορτίο μετά από οποιαδήποτε τυχαία παραγωγή ή παραλλαγή φορτίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η P_{Rt} τόσο πιο ασφαλές είναι το σύστημα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ Η ΣΥΝΤΑΞΗ ΤΗΣ ΕΝΤΟΛΗΣ «fmincon»

Η *fmincon* συνάρτηση βρίσκουμε το ελάχιστο περιορίζεται μη γραμμικών πολυμεταβλητών και ένα περιορισμένο ελάχιστο μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών.

Με την *fmincon* συνάρτηση προσπαθούμε να λύσουμε τα προβλήματα της μορφής:

$\min f(x)$ υπόκειται σε: $A * x \leq b$, $Aeq * x = beq$:Γραμμικοί περιορισμοί

x $C(x) \leq 0$, $Ceq(x) = 0$:Μη γραμμικοί περιορισμοί

$lb \leq x \leq ub$:Όρια

Η *fmincon* υλοποιεί τέσσερις διαφορετικούς αλγόριθμους του εσωτερικού σημείου, το *SQP*, του ενεργού συνόλου, και των ανακλαστικών της περιοχής εμπιστοσύνης.

Γενικά η $X = \text{fmincon}(\text{FUN}, X0, A, B, Aeq, Beq, LB, UB)$ ορίζει τα ανώτερα (*UB*) και τα κατώτερα (*LB*) όρια για τις μεταβλητές σχεδιασμού, *X*, έτσι ώστε η λύση να βρεθεί στο εύρος $lb \leq x \leq ub$. Αν δεν υφίστανται όρια χρησιμοποιούμε κενούς πίνακες *UB* και *LB*. Ορίζουμε $LB(i) = -Inf$ αν $X(i)$ είναι απεριόριστο κάτω, που $UB(i) = Inf$ αν $X(i)$ είναι απεριόριστο πάνω.

Στην 1^η Περίπτωση υπολογίζουμε το λ , άρα χρειαζόμαστε έναν αλγόριθμο που υπολογίζει τους πολλαπλασιαστές *Lagrange*. Ο αλγόριθμος αυτός είναι $[X, FVAL, EXITFLAG, OUTPUT, LAMBDA] = \text{fmincon}(\text{FUN}, X0, \dots)$ στη λύση *LAMBDA.lower for LB, LAMBDA.upper for UB, LAMBDA, LAMBDA.ineqlin* είναι για τις γραμμικές ανισότητες, και *LAMBDA.eqlin* είναι για τις γραμμικές ισότητες. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε απώλειες άρα έχουμε οι πίνακες *a, b* είναι κενοί, όπως και οι πίνακες *ub* και *lb*.

Έτσι, βρίσκουμε το λ : $LAMBDA.eqlin = 30 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$, το $LAMBDA.ineqlin = 0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$, αυτός ο υπολογισμός προέκυψε επειδή είμαστε στην περίπτωση της *Οικονομικής Κατανομής Φορτίου Με Περιορισμούς Ισότητας*, και *X* είναι οι τιμές ισχύος $P1_{opt} = 200MW$ και $P2_{opt} = 50MW$. Τέλος, σαν *FVAL* ορίζουμε το ωριαίο κόστος $C_{TOTAL} = 66750\$/h$.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Ανώτατης Σχολής Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, τον Κύριο Λεωνίδα Δρίτσα, για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της Πτυχιακής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, καθώς και για την δυνατότητα που μου πρόσφερε να παρουσιάσω ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Μπακιρτζής «Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας» Εκδ. ΖΗΤΗ, 1998
- [2] Mathworks Optimization Toolbox for modeling and simulating electrical power systems (<http://www.mathworks.com/products/optimization/>)
- [3] Daniel S. Kirschen, Goran Strbac «Fundamentals of Power System Economics» (<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470845724.html>)
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg «Power Generation, Operation and Control (3rd Ed.)»
- [5] Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo, Claudio Canizares «Electric Energy Systems Analysis and Operation», (<https://www.crcpress.com/Electric-Energy-Systems-Analysis-and-Operation/GomezExposito-Conejo-Canizares/9780849373657>)
- [6] Δρ. Γεράσιμος Κ. Παγιατάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε., «ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ (βασικά στοιχεία)», Δεκέμβριος 2013
- [7] DANIEL S. KIRSCHEN, University of Washington, Electrical Engineering Introduction to Optimization (Part 2), Math typed by LDRI 18/Sep/2016 23.59