Systèmes de conduite des grands réseaux électriques

- Fonctions et structures des systèmes d'énergie électrique
- Fonctionnement physique des systèmes d'énergie électrique
- Centres de conduite
- Problèmes ouverts (1 séance de type séminaire)

Fonctions logicielles

- Estimation d'état et prédiction de la charge
- Analyse et amélioration de la sécurité
- Optimisation du fonctionnement
- Marchés électriques

Menu

- Eléments de théorie de l'optimisation sous contraintes
- Economic dispatch
- Unit commitment
- OPF

Optimisation sous contraintes

- Minimiser une fonction $f(\underline{x})$
- Sous les contraintes
  - d'égalité : $\underline{e}(\underline{x})=0$
  - d'inégalité : $\underline{i}(\underline{x}) \leq 0$
- Terminologie
  - f(.) : fonction objectif
  - $\underline{x}$ satisfaisant aux contraintes est dit admissible
  - si aucun $\underline{x}$ admissible : problème infaisable

Nature des contraintes

- Egalité : lois de Kirchhoff, bilans d'énergie…
- Inégalité : domaine de fonctionnement admissible, possible (limitation des ressources, sécurité…)

Types de fonction objectif

- Critères économiques : coût de production
- Déviation minimale par rapport au point courant
- Qualité du plan de tension
- ...

Types de variables x

- On distingue deux grandes classes de problèmes
  - variables réelles (et fonctions f,e,i « gentilles »)
    - ➪ on peut faire appel à l'analyse classique
  - variables discrètes (on/off)
    - ➪ on doit faire appel à l'analyse combinatoire et aux techniques de « recherche heuristique »

☨ Souvent les deux types de variables se mélangent

➪ on doit décomposer le problème et combiner les solutions partielles

Théorie de l'optimisation gentille

- Contraintes i(.) actives à l'optimum
  - agissent comme des contraintes d'égalité
- Contraintes inactives
  - on peut les oublier
- Moralité
  - si on peut deviner les contraintes actives à l'optimum, le problème revient à une minimisation sous contraintes d'égalité

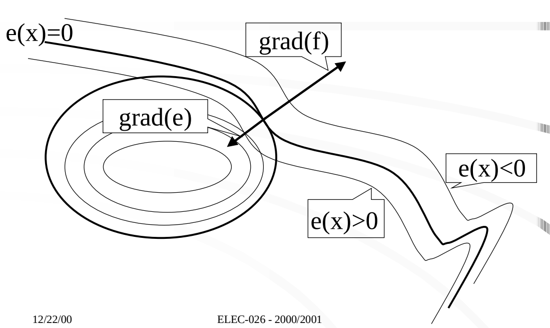
Optimisation sans contraintes

- Un minimum local n'est pas nécessairement un minimum global
- Si fonction convexe, alors oui… 
- En un minimum (local) le gradient de la fonction objectif doit être nul
  - cf. Développement en série de Taylor
  - convexité : matrice Hessienne (semi)définie positive

Contraintes d'égalité

- Si on pouvait résoudre les contraintes explicitement, on se rammènerait à un problème sans contraintes avec un plus petit nombre de degrés de liberté
- En pratique, cela n'est pas possible
  - Théorie des Lagrangiens
  - à l'optimum (local) le gradient de f doit être normal au sous-espace défini par les contraintes
  - Donc : grad(f) = λ grad(e)

Géométriquement



Théorie générale

- Si m contraintes d'égalité on forme un vecteur de variables de Lagrange de dimension m : $\underline{\lambda}$
- Lagrangien : $L(\mathbf{x},\boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T e(\mathbf{x})$
  - A l'optimum on doit avoir

$$\nabla_{x,\lambda} L(\mathbf{x},\boldsymbol{\lambda}) = 0$$
$$\Rightarrow \begin{cases} \nabla_x L(\mathbf{x},\boldsymbol{\lambda}) = \nabla_x f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \nabla_x e(\mathbf{x}) = 0 \\ \nabla_\lambda L(\mathbf{x},\boldsymbol{\lambda}) = e(\mathbf{x}) = 0 \end{cases}$$

Traitement des contraintes d'inégalité

- Il faut 'deviner' les contraintes actives
- Pour une contrainte d'inégalité active, la valeur du multiplicateur de Lagrange doit être positive (cf gradient orienté dans le bon sens)
- Voir dessin...

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Autre manière de traiter les contraintes d'inégalité

- On introduit des variables 'bidon' supplémentaires et on transforme de cette manière les contraintes d 'inégalité en contraintes d'égalité

$$i(x) \leq 0 \rightarrow i(x) + y^2 = 0$$

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Formulation duale

- Soit $q(\boldsymbol{\lambda}) \therefore \min_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x},\boldsymbol{\lambda})$

  $\text{Problème dual}: q^*(\boldsymbol{\lambda}) = \max_{\boldsymbol{\lambda}} q(\boldsymbol{\lambda})$
- On montre que la solution de ce problème est aussi la solution du problème primal

➪ itérations lambda suivies d'itérations x

NB: le fait de maximiser par rapport à lambda pénalise les solutions qui ne satisfont pas les contraintes.

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Optimum local vs global

- Les techniques numériques (itératives) convergent vers un optimum local

➪ Si le problème peut présenter plusieurs minima locaux, il faut bien choisir le point de départ et/ou réinitialiser plusieurs fois le processus de recherche...

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Economic Dispatch

La 2CV de l'optimisation

...

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Economic Dispatch

Problème pratique

Assurer le bilan de puissance au moindre coût, à un instant donné, la demande étant connue, les générateurs à utiliser étant en service et les fonctions de coût étant données

On suppose également disposer d'un modèle qui relie directement les pertes aux variables de commande (niveaux de puissance active des N générateurs).

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Economic dispatch (modèle 0)

- On néglige complètement le réseau

$$\text{Variables (productions actives)}: P_i^g, i = 1, \ldots, N$$

$$\text{Objectif (coût minimal)}: \min_{P_i^g} \left(\sum_{i=1}^{N} F_i\left(P_i^g\right) \right)$$

$$\text{Contrainte d'égalité (bilan de puissance)}: \phi = P_{Tot}^l - \sum_{i=1}^{N} P_i^g = 0$$

$$\text{Contraintes d'inégalité}: P_{i,\min}^g \le P_i^g \le P_{i,\max}^g$$

Solution

(en négligeant les contraintes d'inégalité)

$$L\left(P_i^g, \lambda\right) = \sum_{i=1}^{N} F_i\left(P_i^g\right) + \lambda\left(P_{Tot}^l - \sum_{i=1}^{N} P_i^g \right)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial P_i^g} = 0 \Rightarrow \dfrac{\partial F_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g} = \lambda \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow P_{Tot}^l - \sum_{i=1}^{N} P_i^g = 0 \end{cases}$$

Discussion

- La premiére équation $\dfrac{\partial F_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g} = \lambda$
  - signifie qu'à l 'optimum tous les coûts incrémentaux doivent être égaux
  - à la solution λ représente le coût incrémental des toutes les unités
- La seconde équation $P_{Tot}^l - \sum_{i=1}^{N} P_i^g = 0$
  - bilan de puissance

Discussion suite

- Courbes de coût convexes -> problème convexe -> solution unique
- Algorithme de solution dual
  - On choisit λ_0
  - On calcule ensuite les solutions de $\dfrac{\partial F_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g} = \lambda_0, \forall i$
  - Avec ces valeurs on calcule le bilan
    - si excès de production, cela veut dire que λ_0 est trop grand
    - si défaut de prodution, il faut l'augmenter

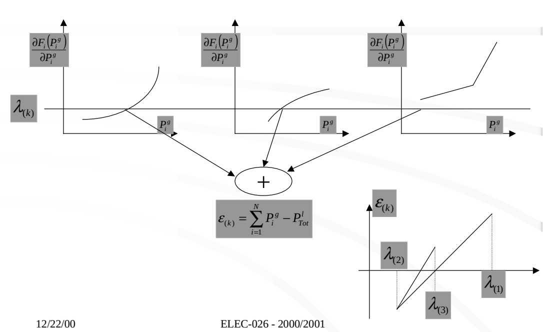
Raffinements (1/3)

- Prise en compte des contraintes d'inégalité
  - Si dans le processus un générateur bute sur une contrainte d'inégalité on le sort du problème en fixant sa production à la contrainte
  - En cours d'itération on surveille que les conditions suivantes restent vérifiées pour tous les générateurs en contrainte

$$\text{Si } P_i^g = P_{i,\max}^g, \text{ il faut que } \frac{\partial F_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g} \le \lambda$$

$$\text{Si } P_i^g = P_{i,\min}^g, \text{ il faut que } \frac{\partial F_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g} \ge \lambda$$

Algorithme (graphiquement)



Raffinements (2/3)

- Prise en compte des pertes dans le bilan
- Remplacement de la contrainte de bilan de puissance par $P^l_{Tot} + \Delta P\left(P^g_1, \ldots, P^g_N\right) - \sum_{i=1}^{N} P^g_i = 0$
- Le problème devient plus difficile à résoudre car, suite à l'introduction du terme de pertes les équations de stationarité du Lagrangien deviennent des équations couplées.

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Solutions

- Prise en compte explicitement des équations de load-flow : problème de l 'OPF
- Approximation (linéaire ou quadratique) découplée des pertes en fonction des niveaux de production :

$$\Delta P\left(P_1^g, \ldots, P_N^g\right) \cong \sum_{i=1}^{N} g_i\left(P_i^g\right)$$

$$\Rightarrow L\left(P_i^g, \lambda\right) = \sum_{i=1}^{N} F_i\left(P_i^g\right) + \lambda\left(P^l_{Tot} + \sum_{i=1}^{N} g_i\left(P_i^g\right) - \sum_{i=1}^{N} P_i^g\right)$$

Les conditions d' optimalité deviennent

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial P_i^g} = 0 \Rightarrow \dfrac{\partial F_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g} = \lambda\left(1 - \dfrac{\partial g_i\left(P_i^g\right)}{\partial P_i^g}\right) \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow P^l_{Tot} + \sum_{i=1}^{N} g_i\left(P_i^g\right) - \sum_{i=1}^{N} P_i^g = 0 \end{cases}$$

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

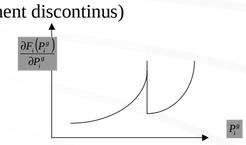
Modèle de pertes

- Principe :
  - utilisation d'une approximation linéaire à la solution du loadflow (pas si mauvais)
  - Courants peuvent s'exprimer linéairement en fonction des injections de puissance
  - Pertes sont approximées par une fonction quadratique des puissances produites
- En pratique : les modèle de pertes est un sous-produit du loadflow ou de l'estimateur d'état, rafraichi de temps en temps

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Raffinements (3/3)

- Quid si courbes de coût non convexes ?
  (souvent le cas en pratique pour les machines à plusieurs étages)
- Se traduit par des coûts incrémentaux non-monotones (et typiquement discontinus)



- Nécessite un approche « combinatoire » pour résoudre le problème (cf Unit Commitment)

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Unit Commitment

- Version de base
  - Quelles unités faudra-t-il mettre en service pour répondre à la demande dans l'heure qui suit ?
- Version étendue
  - Même question, mais étendue sur un intervalle de temps : journée ou semaine
- Versions améliorées

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

UC de base
Remarques préliminaires

Si on se donne un ensemble d'unités en supposées démarrées, ED définit coût optimal résultant de la distribution optimale de P sur ces unités

Comme les unités ne peuvent pas fonctionner à P nulle (en général), ED ne sait pas identifier les unités qui devraient être à l'arrêt

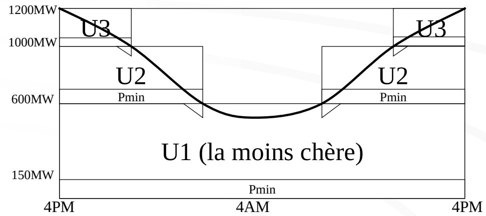
De plus, démarrer les unités est une opération qui conduit à un coût (fixe) : coût incrémental infini à l 'origine

➪ UC est un problème d'optimisation mixte discret/continu

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

UC : Illustration

Suivi de la charge journalière



12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

UC: contraintes à modéliser

- Réserve tournante : couvrir les incertitudes
  - en suivant les règles de bonne pratique en vigueur
  - toutes les unités ne sont pas capables de répondre assez vite : contraintes dynamiques sur la réserve
- Contraintes dynamiques sur les unités thermiques + coût de dém   arrage
  - Minimum up/down times
  - Contraintes de personnel : dans une centrale on ne peut pas démarrer simultanément deux unités
- Must run : soutient de la tension, co-génération
- Contraintes de fuel : quand il n'y en a plus ...

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

UC : combinatoire

- Soient N unités à commettre pour une durée discrétisée en M intervales
- Nombre total de combinaisons possibles

$$\left(2^N - 1\right)^M$$

- P.ex. 10 unités pour 24 heures : 1,7 e 72
- P.ex. 30 unités pour 24 heures : 5,5 e 216

Nombre d'électrons dans l'Univers : 1 e 80

Age de l'Univers en secondes : 3 e 17

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

UC : algorithmes

- Quelques possibilités
  - Listes de priorités
  - Programmation dynamique
  - Branch and bound
  - Algorithmes génétiques

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Liste de priorités

- Les unités sont triées par ordre de priorités afin de réduire la combinatoire
  - Ordre d'empilement : coût moyen à la puissance maximale
  - Si pas de contraintes dynamiques, solution élémentaire à chaque pas de temps obtenue par empilement
  - Sinon, liste de priorités définit un ordre préférentiel : reduction de la combinatoire

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

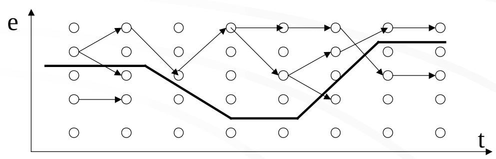
Programmation dynamique

- On se rammène à un problème de recherche du plus court chemin dans un graphe
- Noeuds du graphe arrangés par t croissant (1, …, M)
  - e(t) = combinaison d'unités en service à l'instant t
  - solution UC : suite e(1), e(2), …, e(M)
  - transition : passage de e(t-1) à e(t)
    - coût de la transition
      - coûts de démarrage / arrêt
      - coûts de fonctionnement période t (solution de ED avec e(t))
  - contrainte : e(t) doit permettre de déservir la charge l(t) + réserve
- UC : trouver le chemin de coût minimal

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Algorithme (Viterbi)

- Principe : on trouve tous les plus courts chemins dans le graphe suivant



Propriété de base

- Si e(1) … e(M-1) e(M) est le plus court chemin de durée M se terminant à l ’état e(M), alors l’un quelconque de ses préfixes e(1) … e(k) est aussi le plus court chemin de durée k se terminant en e(k)

➪ Algorithme itératif (récursif)

Difficulté

- Complexité de l’algorithme

  Proportionnelle au nombre de transitions possibles à chaque pas de temps multiplié par la durée totale :

$$M\left(2^N - 1\right)^2$$

- Pas exploitable si N > 10
- Reduction de la combinatoire en utilisant une liste de priorités, ou en élagant le graphe

UC : remarques

- UC est essentiellement un problème qui doit être résolu par les producteurs
- Le gestionnaire du réseau de transport « subit » la stratégie des producteurs
- Le GRT peut néanmoins accepter ou refuser un plan de démarrage

UC dans un système Hydro-Thermique

- Il faut prendre en compte les couplages hydrauliques des centrales
  - Lois de « Kirchhoff » hydrauliques
  - Contraintes de débit de rivières et de niveau d’eau dans les réserves
  - Valeur économique de l’eau

OPF : optimal power flow

OPF : explications

- Principales caractéristiques
  - Modélisation des équations de load-flow
  - Possibilité de prise en compte des limites de sécurité (N, N-1)
  - Modélisation correcte des pertes actives
  - Réprésentation réaliste des problèmes Q/V

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Formulation du pb OPF

- Minimiser f(x,u)

  x = vecteur d 'état (comme pour le loadlfow)

  u=vecteur de commande (Pg, Qg…)
- Contraintes d'égalité : g(x,u,p) = 0 (load-flow)

  Avec : p = vecteur de paramètres (p.ex. Charge)
- Contraintes d'inégalité
  - um < u < uM
  - hm< h(x) < hM (transits, tensions, bilan de réactif…)

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Méthodes et algorithmes

- Newton
- Programmation linéaire
- Point intérieur
- …

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

SCOPF

- SCOPF : security constrained OPF
- Prendre en compte les contraintes de sécurité en N-1
- Pour une contingence on doit ajouter
  - g'(x',u,p,u') = 0
  - hm<h(x')<hM
  - x' = vecteur d'état en N-1
  - u' = vecteur de commande curative (intervient dans la fonction objectif)

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Coûts marginaux

- Sous-produit de l 'OPF
- Coût marginal en un nœud
  - de combien augmenterait la valeur de f si on augmentait de 1MW la consommation au nœud i
  - valeur donnée par le multiplicateur de Lagrange relatif à la i-ème équation de load-flow (bilan de puissance active au nœud i)

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Comparaison ED et OPF

- ED néglige la structure du réseau
  - pas de contraintes de sécurité
  - coût marginal indépendant de l'endroit où on comsomme
- OPF prend en compte le réseau
  - contraintes de sécurité
  - coût marginal sensible à la localisation de l'incrément de consommation

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Utilisation de l'OPF pour le réglage du plan de tension

- Fonction objectif
  - Minimisation des pertes
  - Maximisation des réserves de réactif
- Grandeurs de commande
  - Mvars produits (générateurs, compensateurs)
  - Bancs de condensateurs/selfs
  - Plots des transformateurs
- Contraintes : usuelles (tensions, courants)

Marchés électriques

- Discussion de deux modèles de marchés et explications sur 'comment ça marche'
- Objectif d'un modèle de marché
  - faire fonctionner la concurrence pour aboutir à un plan de production/consommation
- Acteurs : genco, consumer, GRT
- Deux modèles
  - Pool
  - Bilateral transactions

Modèle ' Pool '

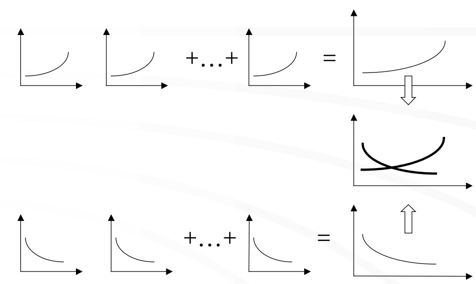
- Tout le monde boît la même soupe…
- Offre de MW (pour une heure)

$P_i^g(\$)$ chaque unité de production soumet une offre qui indique combien il veut produire en fonction du prix du marché ($)

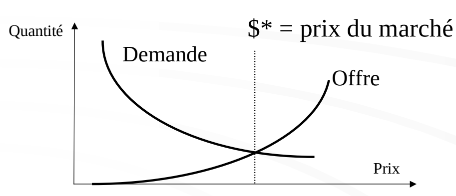
$P_j^l(\$)$ chaque acheteur soumet aussi une courbe de prix auxquels il est prêt à acheter

- Equilibre $\sum_{i=1}^{N} P_i^g(\$) = \sum_{j=1}^{M} P_j^l(\$) \Rightarrow \$^*$

Graphiquement



Prix du marché



Pool fonctionnement à l'anglaise

- L'équilibre détermine la quantité totale vendue et le prix payé par tous les acheteurs et reçu par tous les producteurs
- Détermine aussi le niveau de production et consommation en chaque nœud du réseau
- On vérifie ensuite si les contraintes d'exploitation sont vérifiées tout en ajoutant les réserves nécessaires

Mécanisme de gestion des congestions

- Objectifs
  - satisfaire les contraintes
  - minimiser les coûts
  - envoyer les signaux économiques aux acteurs
- Commandes
  - diminution/augmentation de productions
  - diminution de consommations

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Peut être résolu par OPF

- A la sortie de l'OPF le GRT sait comment il doit modifier le plan de production en achetant et en revendant de l'énergie aux bons endroits
- Coût de l'opération :
  - Producteur pénalisé : reçoit différence entre prix annoncé et prix du marché (son bénéfice si pas de contraintes réseau)
  - Producteur favorisé : reçoit prix annoncé
  - Facture GRT: différence entre prix annoncés

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Signaux économiques

- But : informer les producteurs et les consommateurs que les contraintes réseau existent et coûtent de l'argent
  - ➪ influencer les stratégies d'offre et de demande dans le bon sens

➪ Idée générale : réinjecter les coûts de redispatch (gestion des congestions) sous la forme de prix du service de transport

➪ Essayer de différencier entre les « bons » et les « mauvais » en exploitant l'information des coûts marginaux sortis de l'OPF

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001

Problèmes

- But du GRT : ne pas discriminer
- Solution OPF : souvent très plate près de l'optimum
  - solutions multiples quasi-équivalentes du point de vue du coût de redispatch, mais conduisant à des redispatch et des coûts incrémentaux très différents
  - risque de pénaliser/favoriser de manière arbitraire...

12/22/00 ELEC-026 - 2000/2001