Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 9

Artikel: Optimisation économique des mouvements d'énergie

Autor: Bart, Alain / Benahmed, Mohammed

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902067

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'optimisation des mouvements d'énergie permet de minimiser les coûts totaux de l'approvisionnement électrique d'une entreprise électrique possédant des moyens de production. D'une part la production hydraulique accumulée est concentrée sur les périodes ayant la plus grande valeur et d'autre part les achats sont effectués pendants les périodes creuses. Par une modélisation judicieuse du problème, il est possible de réaliser différents calculs économiques permettant une exploitation optimale des ressources hydrauliques. L'utilisation d'un outil de programmation linéaire standard permet de résoudre rapidement des problèmes de grande taille et évite les gros efforts de développement liés à un algorithme d'optimisation spécifique.

Optimisation économique des mouvements d'énergie

■ Alain Bart, Mohamed Benahmed

Le but de cet article est de présenter une méthode d'optimisation permettant de minimiser le coût de l'approvisionnement énergétique en réalisant un engagement optimal d'un parc de production hydraulique. Le modèle permet d'optimiser le plan de production d'un parc de centrales hydrauliques en tenant compte de différents critères tels que la prévision du prix sur le marché spot, la prévision des apports d'eau, la prévision de la charge du réseau ainsi que tous les contrats d'approvisionnement et de fourniture.

Ce travail est le résultat d'un projet commun entre le Laboratoire des Réseaux Electriques de l'EPFL et de BKW FMB Energie SA. Il a été le sujet d'une publication à la conférence Pica 1996 [1] et a reçu un prix innovation ASE-ETG en 1997.

Le modèle de simulation proposé permet de

- déterminer l'engagement optimal de toutes les centrales,
- optimiser la production d'un complexe,
- déterminer la période optimale pour un nouveau contrat,
- évaluer l'influence de nouveaux contrats sur l'engagement annuel,
- optimiser les périodes de révision des centrales,
- évaluer le gain de qualité amené par une extension dans une centrale existante.

Modèle

Le modèle couvre une certaine période (saison, année) qui est divisée en intervalles. Pour chacun de ces intervalles, on détermine l'activité de chaque centrale et contrat ainsi que l'ampleur des activités sur le marché spot. Nous avons considéré plusieurs sources d'énergie et différentes contraintes (physiques, techniques, économiques et environnementales) ont été introduites pour chacune des sources: on obtient alors un problème d'optimisation sous contrainte.

Les contrats

Les contrats peuvent avoir différentes formes et surtout plusieurs degrés de liberté.

Contrat (d'achat ou de vente) dit fixe

Sur ces contrats, la quantité d'énergie ainsi que le programme horaire d'achat

Adresse des auteurs
Dr *Alain Bart* et Dr *Mohamed Benahmed*
BKW FMB Energie SA, 3000 Berne 25
Email alain.bart@bkw-fmb.ch
mohamed.benahmed@bkw-fmb.ch

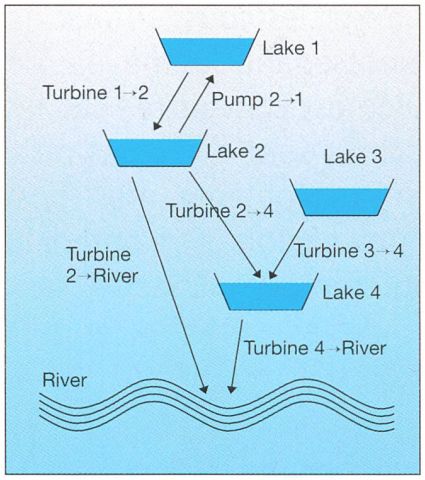

Figure 1 Complexe hydraulique avec plusieurs centrales

ou de vente sont entièrement spécifiés et rien ne peut être changé: ce sont simplement des charges ou des productions supplémentaires dans le bilan d'équilibre production/consommation.

Contrat dit variable

Pour ces contrats, la quantité est généralement fixée mais des variations sont prévues: il est possible, par exemple, de réduire la puissance pendant quelques jours ou d'interrompre la fourniture (ou le prélèvement) pendant un certain nombre de jours sur l'ensemble de la période. On définit alors la période de validité du contrat, la quantité d'énergie devant être prélevée ou fournie par mois et sur l'ensemble de l'année. On pourra, par exemple, prélever de l'énergie sous une puissance de 10 MW, avec une quantité mensuelle comprise entre 3 et 5 GWh et un total sur l'ensemble de l'hiver compris entre 20 et 25 GWh.

Contrats d'échange

Contrairement aux autres contrats, il n'y a pas de prix pour l'énergie pour ce type de contrat. Un facteur d'échange permet de définir la quantité d'énergie que l'on doit prélever en fonction de l'énergie que l'on fournit: ce facteur représente la différence de qualité entre la fourniture et le prélèvement (jour–nuit, été–hiver). Pour ces contrats on peut définir plusieurs facteurs d'échanges en fonction de la forme de l'échange, ainsi que des rapports minimal et maximal entre l'énergie fournie et prélevée (dans le cas où une partie de l'énergie peut ne pas être échangée mais payée).

Centrales thermiques

On ne tient pas compte des coûts fixes (maintenance et investissement pour les installations) car ils doivent également être versés lorsqu'aucune énergie n'est produite. Ainsi, le prix de l'énergie est simplement le coût du combustible utilisé, qui lui est alors directement en rapport avec l'énergie produite. Avec cette simplification, il est possible de remplacer les productions thermiques par de simples contrats d'achat. Pour les centrales ayant une certaine flexibilité de production, on introduit des bornes extrémales (P_{max} et P_{min}) directement dans la définition du contrat.

Complexe hydraulique

Un complexe hydraulique peut comporter plusieurs centrales et lacs d'accumulation ou de compensation en cascade reliés entre eux par des conduites forcées. (fig. 1)

Dans le modèle considéré, on ne tient pas compte du temps nécessaire à l'eau pour passer d'un lac vers le suivant.

Les complexes hydrauliques sont modélisés en deux parties: la partie hydraulique et la partie électrique.

- La partie hydraulique comprend les lacs ainsi que leurs contraintes: niveau maximal et minimal, niveau initial et final ainsi que les apports prévus.
- La partie électrique comprend les turbines et les pompes ainsi que leurs contraintes: énergie minimale et maximale productible (en fonction de la disponibilité, des révisions), un rendement et un coefficient énergétique.

Puisque toutes les quantités considérées sont des MWh, il faut définir des coefficients énergétiques pour chaque turbine de manière à répartir l'énergie Q_1 prélevée dans le lac amont: une part est transformée en électricité (E_{prod}) et l'autre part (Q_2) va dans le lac aval (fig. 2). De façon symétrique, on définit la quantité d'énergie arrivant dans le lac amont suite à un pompage (fig. 3).

L'introduction de turbines fictives a permis de simuler le déversement des lacs: l'énergie produite par ces turbines n'est pas comptabilisée dans l'équilibre production/consommation et de ce fait ces turbines sont engagées uniquement lorsque la simulation n'aboutit à aucune solution sans elles (indisponibilité temporaire d'une centrale, apport d'eau extraordinaire). Il est également possible de définir des centrales fil de l'eau qui alimentent un lac d'accumulation. Un coefficient énergétique doit alors également être défini afin de déterminer quelle quantité d'énergie sera encore produite par les différentes centrales situées en aval.

Les contraintes sur les niveaux des lacs s'expriment comme la somme entre le niveau au début de la période et tous les apports arrivant dans le lac (naturels, par une centrale fil de l'eau située en amont, pompés depuis une centrale en aval et turbiné depuis une centrale située en amont) moins tous les prélèvements (pompage vers un lac en amont, turbinage vers un bassin aval): cette valeur doit être située entre les bornes minimales et maximales pour chaque période.

Une contrainte particulière permet de définir le niveau final de chaque lac (généralement égal au niveau initial pour une simulation annuelle).

Marché spot

On doit définir un prix pour chaque période ainsi qu'une quantité maximale pour les achats ainsi que pour les ventes. La prévision du prix est basée sur des données statistiques ainsi que sur une tendance court terme.

Contrainte d'égalité

Finalement, une contrainte d'égalité par période rassemble toutes les productions et consommations de manière à ce qu'elles soient toujours égales.

$\sum$ contrat achat $+\sum$ production nucléaire $+\sum$ production fil de l'eau $+\sum$ production accumulée $+\sum$ achat spot

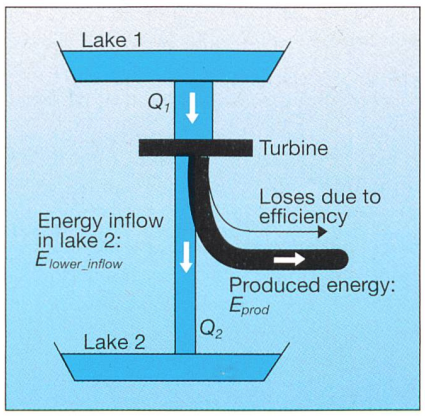

Figure 2 Production d'énergie lors d'un turbinage

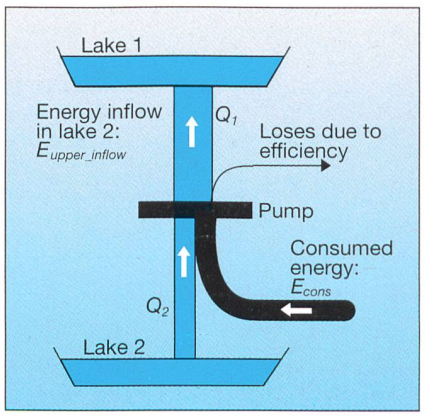

Figure 3 Consommation d'énergie lors d'un pompage

$\equiv \sum$ contrat vente $+\sum$ charge du réseau $+\sum$ pompage $+\sum$ vente spot.

Fonction objectif à minimiser

La fonction à minimiser représente la somme des prélèvements d'énergie qui ont un coût (contrat achat, spot, production nucléaire) moins la somme des ventes (contrat de vente, spot). Dans le modèle considéré l'énergie hydraulique n'a pas de prix direct mais est valorisée indirectement par la valeur du marché spot via l'équilibre production/consommation.

Résolution du problème

Comme présenté précédemment, toutes les contraintes peuvent être exprimées par des inégalités linéaires. De même, les contraintes d'équilibres ainsi que la fonction objectif sont linéaires. De plus toutes les inconnues sont de type variable continue et le problème de l'optimisation peut ainsi être représenté par un problème de programmation linéaire. L'approche par la programmation linéaire est bien adaptée à ce type de problème bien qu'il faille définir chaque variable pour chaque période du système ainsi qu'une relation assurant le lien entre l'état d'une variable à un instant donné et son état à l'instant suivant. L'avantage principal réside dans l'existence de méthodes bien connues (Simplex) qui permettent de résoudre ces problèmes de manière très rapide, même pour des systèmes de grande taille.

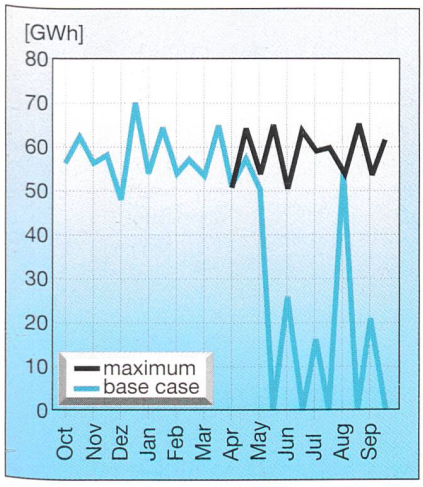

Figure 4 Profil de prélèvement d'un contrat variable

La formulation générale du problème de programmation linéaire est la suivante:

$$\min \mathbf{c} \cdot X \qquad (1)$$

sous les contraintes

$$\mathbf{a} \cdot X > \mathbf{b} \qquad (2)$$

$$\mathbf{d} \leq X \leq \mathbf{e} \qquad (3)$$

avec X représentant le vecteur d'inconnues à déterminer et les vecteurs a, b, c, d, e des paramètres fixes et connus.

Après plusieurs essais de logiciels, nous avons décidé d'utiliser le logiciel Cplex [2], car ce dernier s'est montré le plus robuste et a toujours trouvé une solution là où les autres logiciels rencontraient des problèmes d'instabilité numérique.

Solution

Selon les objectifs initiaux du projet, la période de simulation correspond à une année hydraulique et chaque mois est divisé en deux périodes «Haut Tarif (HT)» et «Bas Tarif (BT)». Ainsi, toutes les heures HT d'un mois sont regroupées en une seule valeur et représentent un intervalle continu (de même pour les heures de BT). Toutes les valeurs définies pour chaque période sont exprimées en terme d'énergie (également pour les bornes sur les productions et les activités du marché spot). Dans un tel modèle, la chronologie des instants n'est plus respectée, car les heures de HT et de BT sont entremêlées dans un mois, mais les quantités d'énergies mensuelles sont respectées.

Le problème à résoudre comporte, dans le cas de la société BKW FMB Energie SA, 10 complexes hydrauliques totalisant 35 installations de turbinage et 10 de pompage. Dans un premier temps, nous avons considéré 15 contrats fixes et 6 contrats variables. De par le nombre important de lacs (33), on obtient un problème avec environ 2100 variables et 870 contraintes.

Le déroulement complet d'une simulation dure environ 2 minutes sur un PC (Pentium 90 MHz). La résolution complète d'un problème est divisée de la manière suivante:

- création manuelle d'un fichier texte contenant les différentes caractéristiques des lacs, des centrales et des contrats
- création automatique, par le logiciel Matlab, du fichier contenant toutes les équations définissant le problème à résoudre, dans un format adapté au logiciel Cplex
- résolution du problème avec Cplex
- représentation graphique des résultats avec Matlab

Résultat

Suite à une optimisation, on dispose de l'engagement de tous les contrats et de toutes les centrales en fonction de leurs caractéristiques particulières et de leurs contraintes. A partir de la production de chaque centrale ainsi que des apports d'eau il est possible de déterminer le niveau de chaque lac à la fin de chaque mois (un calcul à la fin de chaque période est inutile, car un niveau correspondant uniquement aux prélèvements en HT d'un mois n'a pas de réalité physique).

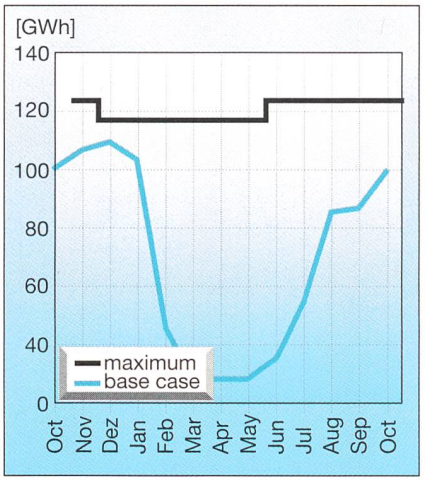

Figure 5 Profil d'un lac d'accumulation

Le profil d'engagement de différentes variables peut être représenté et on peut facilement interpréter ces résultats: un contrat variable (fig. 4) a été, engagé en hiver lorsque les besoins sont importants et de manière réduite en été mais exclusivement en période de HT. Au mois d'août on voit un fort prélèvement illustrant un besoin important pendant ce mois (révision d'une centrale nucléaire).

Le profil d'un lac d'accumulation (fig. 5) est un profil typique avec un maximum au mois de novembre et un minimum aux mois de mars–avril. Pendant l'été, le lac se remplit de manière à atteindre à la fin du mois de septembre le niveau qu'il avait au début du mois d'octobre de l'année précédente.

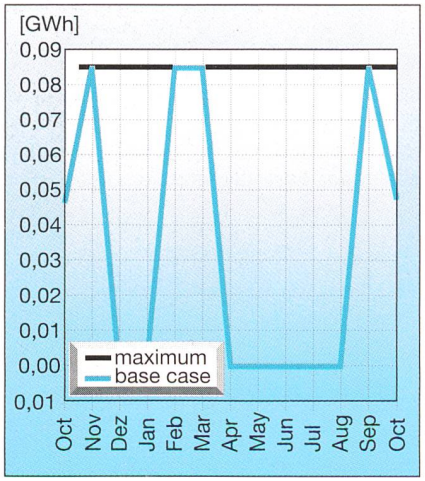

Figure 6 Profil d'un bassin de compensation

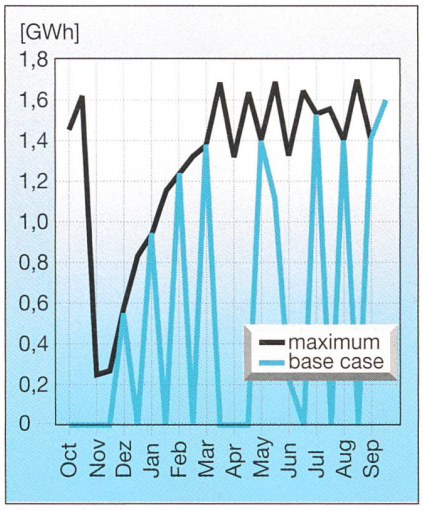

Figure 7 Activité d'une centrale

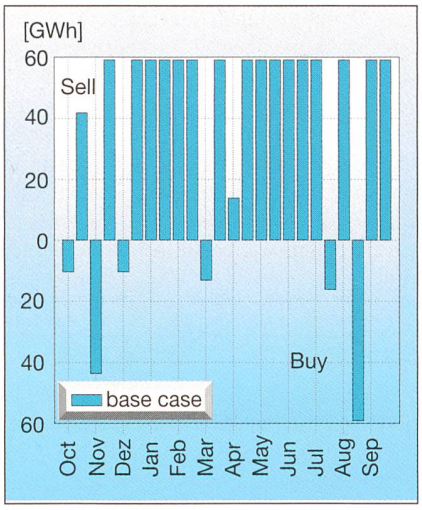

Figure 8 Activité sur le marché spot

Par contre si on regarde le profil d'un bassin de compensation situé entre deux centrales (fig. 6) on voit très bien que ce ne sont plus les apports naturels qui dictent le profil du bassin mais bien les activités des centrales amont et aval: le bassin peut se vider plusieurs fois pendant l'année.

En visualisant l'activité d'une centrale (fig. 7), on voit que la production est limitée par la disponibilité (très faible pour cette centrale en décembre et janvier) et qu'elle n'est utilisée que pendant les périodes de HT.

Finalement en regardant les activités sur le marché spot (fig. 8), on voit apparaître les instants où il manque de l'énergie et les périodes pendant lesquelles on devrait plutôt en vendre.

Implantation

Cet outil permet d'effectuer des optimisations annuelles et multi-annuelles de par sa résolution temporelle. Devant un nouveau besoin de simulation et d'optimisation sur des périodes plus courtes, le modèle a été adapté de manière à traiter des problèmes avec une résolution horaire (720 valeurs par mois au lieu de deux). De cette manière, il est possible de définir exactement les indisponibilités, les contraintes sur les lacs ainsi qu'une évolution plus détaillée des prix. Par contre avec cette résolution temporelle, la quantité de données à définir est très grande (apports d'eau horaire, charge du réseau, etc.) et pas forcément facile à définir.

Une fois un modèle complètement défini, il est facile d'adapter la fonction objectif de manière à modifier le but de l'optimisation. Ainsi, il est également possible de quantifier l'amélioration de la qualité d'une production hydraulique par une modification des installations, de calculer la valeur d'une production hydraulique par rapport à une structure de prix donnée, d'estimer les pertes liées à une défaillance et finalement d'effectuer une gestion optimale d'un parc de production en fonction de différents critères.

Conclusion

Le modèle proposé est suffisamment général et souple de manière à pouvoir être utilisé dans différentes situations où la production d'un ou plusieurs complexes hydrauliques doit être définie de manière optimale. Conçu au départ avec une période de résolution mensuelle, le modèle est en cours d'adaptation de manière à pouvoir couvrir des besoins différents en termes d'optimisation. L'élaboration de scénarios permet de comparer simultanément différents résultats de manière à pouvoir évaluer l'influence d'un paramètre (hydraulicité plus ou moins forte, variation du prix spot, charge du réseau en fonction de la température, etc.) sur l'ensemble de l'optimisation.

Bibliographie

[1] *A. Bart, M. Benahmed, R. Cherkaoui, G. Pitteloud, A. Germond:* Long-term Energy Management Optimization According to Different Types of Transactions. PICA 1997, Colombus, May 11–16.

[2] *Cplex Optimization Inc:* Using the Cplex Base System, Version 4, 1989–1995.

Wirtschaftliche Optimierung von Energieflüssen

Die Optimierung des Energieverkehrs erlaubt, die gesamten Energiebeschaffungskosten eines Elektrizitätswerkes zu minimieren. Die Produktion hydraulischer Energie wird auf die Perioden mit höchstem Strompreis und der Stromzukauf auf Perioden des geringsten Stromverbrauchs verlegt. Bei geschickter Problem-Modellierung können verschiedene ökonomische Kalkulationen durchgespielt und eine optimale Nutzung der hydraulischen Ressourcen erreicht werden. Mittels eines Standardwerkzeugs für die lineare Programmierung lassen sich auch anspruchsvolle Rechenaufgaben schnell bewältigen, so dass auf grosse Entwicklungsaufwendungen, welche für einen spezifischen Optimierungsalgorithmus nötig wären, verzichtet werden kann.

Der SEV auf dem Internet / L'ASE sur l'Internet:
http://www.sev.ch