

平成 21 年 6 月 18 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2005～2008

課題番号：18560291

研究課題名（和文） 競争環境下での連系線設備計画に関する研究

研究課題名（英文） A Study of Network Expansion Planning Under Deregulated Electric Power Systems

研究代表者

久保川 淳司 (KUBOKAWA JUNJI)

広島工業大学・情報学部・准教授

研究者番号：90225194

研究成果の概要：電力系統において、複数の託送が含まれる送電線運用問題に対して、安定度を考慮しつつ、その社会厚生を最大化する手法の提案を行った。提案手法の有効性を確認するため、プロトタイププログラムを作成し、実規模系統に適用した。提案手法を実用的な計算時間で実現するためには、並列計算手法を導入することが必要である。そのため、複数の計算機を接続したグリッドコンピュータ上での実用化についての検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	420,000	3,920,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電気機器工学

キーワード：電力系統工学，最適化理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 1990年代から、欧米においては規制緩和による電力自由化市場の活性化を促進するための施策が実行され、電力販売価格を押し下げる試みが続けられている。日本においても、1995年の電気事業法改正による卸発電事業の部分自由化の後、2000年には大口の顧客に対する小売供給の自由化が実施された。2005年4月からは50kWの高圧需要家に対して小売供給の自由化や日本卸電力取引所の創設などが行われ、燃料費価格の補正を除いた電力価格は徐々に低下しつつある。

(2) 一方、規制緩和の負の側面として、2003年夏には米国ニューヨーク、英国ロンドンや

イタリア全域という世界の大都市で大規模な停電が発生した。これらは大都市から離れた遠隔地から、複数の電力供給会社が連系線（電力会社間を繋ぐ基幹送電線）を通して安価な電力を大量に送電していることに起因していることが報告されている。平常時では問題ない場合でも、過酷事故による連系線電力の急激な変動に対応できず、大規模停電が引き起こされる。競争環境下では安価な電力の長距離大量輸送が求められるため、連系線の重要性はますます高まることが考えられる。

(3) このように、連系線に流れる電力を制御することは大変重要であるにもかかわらず、

2005年4月に電力会社を越えて託送を行う毎に課金される振替託送料金（いわゆるパンケーキ）の廃止により、近距離でも長距離でも同じコストで電力を送ることができることになった。これにより、長距離託送による小売供給が実施され、連系線潮流増加に伴う安定性への懸念が増加している。安定度を維持したまま競争を促進するためには連系線の増強が必要となるが、送電線の建設には莫大な費用がかかり、託送を行う事業者がその費用を負担することは不可能である。そのため、社会的なコンセンサスのもとで、公平な送電線設備計画を策定する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では競争環境下での連系線設備計画手法の提案を行った。連系線利用に関しては、経済的な側面と電力系統運用の技術的側面が存在する。経済的な側面は、複数のプレイヤーが存在する競争市場において、送電線利用に対して社会厚生を最大化する問題として捉えることができる。一方、電力系統運用の技術的側面から考えると、送電線の熱容量制約、電圧安定度制約、過渡安定度制約、緊急時予備力制約等を同時に考慮し、安全な運転を行えるよう配慮しなければならない。日々の電力系統運用では、これらの制約を満足するため、複数の解析プログラムを利用し熟練の運転者により決定されている。

連系線増設には、これら経済性と技術的側面の両方を満足した解を求めなければならない。これまでの研究では、実系統を対象とする大規模問題に対して、これら両方を満足する解を得る手法は存在していない。これは、特に電力系統解析において、大規模問題の解法に問題があったためである。

そこで本研究では、

(1) 連系線設備計画に必要とされる安定度を考慮した電力系統運用最適化計算手法に対して、多数の解析ケースを実行するのではなく発電機電源制限・負荷制限を変数としてモデル化し高速に最適化する手法の開発を行った。

(2) 競争環境下での発電機の運用状態を求めるため、ラグランジュ緩和法による複数のプレイヤーが存在する競争市場での発電機起動停止計画手法の開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 安定度を考慮した電力系統最適潮流計算手法の開発

連系線設備計画を行うためには、運用時に安定度の維持が確保されていることを保証するため、多数の安定度計算が必要とされる。本研究では、微分方程式で表わされる安定度制約を線形化することで最適潮流計算法に組み込むことができた。以下にその定式化を

示す。

① 目的関数

連系線の送電容量を制限する系統の物理的・電気的特性として主に発電機出力制約、電圧安定性制約、熱容量制約、過渡安定度に関する制約があげられ、(1)式のように表すことができる。

$$TTC = \text{Minimum of} \begin{cases} \text{発電機出力制約} \\ \text{電圧安定性制約} \\ \text{熱容量制約} \\ \text{安定度制約} \end{cases} \quad (1)$$

目的関数はエリア間の有効電力潮流の和として(2)式のように表される。

$$P_T = \sum_{i \in S_{SA}, j \in S_{RA}} P_{ij} = \sum_{i \in S_N} \{G_{ij} V_i^2 - V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})\} \quad (2)$$

② 等式制約

等式制約として、潮流方程式、発電機の運動方程式、発電機の初期値方程式がある。

$$\begin{aligned} V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + P_i - P_{gi} &= 0 \\ V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) + Q_i - Q_{ri} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$i \in S_N$

$$\begin{aligned} \delta_i' - \delta_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2} [(\omega_i^t - \omega_0) + (\omega_i^{t-1} - \omega_0)] &= 0 \\ \omega_i^t - \omega_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2} \frac{\omega_0}{M_i} [(-D_i \omega_i^t + P_{mi} - P_{ei}^t) \\ &+ (-D_i \omega_i^{t-1} + P_{mi} - P_{ei}^{t-1})] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$j \in S_G, t \in S_T$

$$P_{ei}^t = E_i'^2 G_{ii}'' + \sum_{j=1}^{ng} \sum_{i \neq j} [E_i' E_j' B_{ij}' \sin \delta_{ij}^t + E_i' E_j' G_{ij}' \cos \delta_{ij}^t] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_i' V_{gi} \sin(\delta_i^0 - \theta_{gi}) - x_{di}' P_{gi} &= 0 \\ V_{gi}^2 - E_i' V_{gi} \cos(\delta_i^0 - \theta_{gi}) + x_{di}' Q_{ri} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

③ 不等式制約

不等式制約としては、通常最適潮流計算法の不等式制約に加えて、発電機の内部位相角の制約を考慮する。

$$\begin{aligned} \underline{P}_{gi} &\leq P_{gi} \leq \overline{P}_{gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{ri} &\leq Q_{ri} \leq \overline{Q}_{ri} & i \in S_R \\ \underline{V}_i &\leq V_i \leq \overline{V}_i & i \in S_N \end{aligned} \quad (7)$$

$$\underline{\delta} \leq \delta_i^t - \delta_{REF} \leq \overline{\delta} \quad i \in S_G, t \in S_T \quad (8)$$

δ_{REF} : 基準ノードの位相角

(7)式は発電機出力の制約、母線電圧の制約を表す。(8)式は各発電機内部位相角の基準ノードからの位相差を表しており、位相安定度制約となっている。これにより過渡安定度を考慮する。

④ 最適化手法

上記の定式化で示された問題を解くために、主双対内点法を用いた最適潮流計算プログラムのプロトタイプを作成した。

(2) 競争環境下での発電機起動停止計画手法の開発

競合する3つの電気事業者が持つ発電機について発電機起動停止計画を行い、地域間にまたがる送電線の許容量内に送電されるように各会社で潮流制約を課す。

①目的関数

発電機起動停止計画における目的関数は、総発電コストを最小化することでありこのように表せる。

$$\min_{U_i^t, P_i^t} C(P_i^t, U_i^t) \quad (9)$$

$$= \min_{U_i^t, P_i^t} \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [FC_i(P_i^t) * U_i^t + ST_i * U_i^t * (1 - U_i^{t-1})] \right]$$

FC は発電する際の燃料費を表す。ST は発電機を起動する時の起動費を表している。

②制約条件

・需給平衡制約 各時間帯において総発電量から送電損失を引いたものと需要は等しくなければならない。

$$\sum_{i=1}^N P_i^t - P_{loss}^t = D^t \quad (t=1, \dots, T) \quad (10)$$

・運転予備力制約 電力システムの信頼性を維持するために、各時間帯において十分な運転予備力が必要である。

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\max} * U_i^t \geq D^t + R^t \quad (t=1, \dots, T) \quad (11)$$

・有効線路潮流制約 各線路の有効線路潮流が過負荷になってはならない。すなわち、有効線路潮流が送電線の容量以内でなければならない。

$$-P_{km}^{\max} \leq P_{km}^t \leq P_{km}^{\max} \quad (t=1, \dots, T) \quad (12)$$

・発電機出力上下限制約 各発電機の上下限値は異なり、以下のようにあらわすことができる。

$$P_i^{\min} * U_i^t \leq P_i^t \leq P_i^{\max} * U_i^t \quad (t=1, \dots, T) \quad (13)$$

・最小起動時間・最小停止時間制約 各ユニットは一旦停止または起動すると、ある最小時間はその状態を保持する必要がある。

$$(X_i^{on}(t-1) - T_i^{on}) * (U_i^{t-1} - U_i^t) \geq 0 \quad (14)$$

$$(X_i^{off}(t-1) - T_i^{off}) * (U_i^{t-1} - U_i^t) \geq 0$$

③全体の解法

発電機起動停止計画をヒューリスティックな手法で制約条件を満足させ、部分問題である線路潮流制約を考慮するものとした。そのため、部分問題である線路潮流制約を最適潮流計算法(OPF)と、ラグランジュ緩和法を用いて解く。

4. 研究成果

(1) 安定度を考慮した電力系統最適潮流計算手法

開発した安定度を考慮した最適潮流計算

法の有効性を確認するため、日本の中西地域(60Hz)系統の特徴を取り込んだ IEEJ West30 系統に対してシミュレーションを行った。

①シミュレーション条件

図1で示される IEEJ West30 系統に対してシミュレーションを行った。

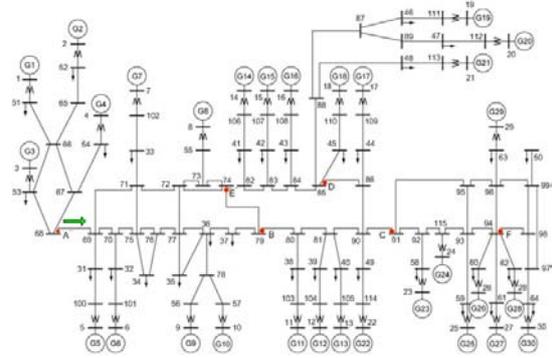


図1 IEEJ West30 系統

本研究は、連系線での送電可能量を最大化する際に電源制限を考慮するため、各発電機が複数の発電機群から構成されているものとした。図2で示されるように、各発電機10%を電源制限できるものとしてモデル化した。

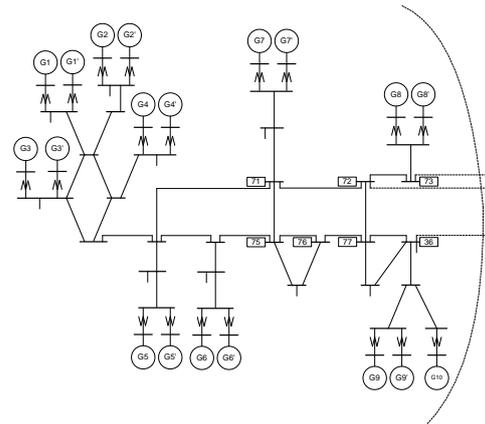


図2 電源制限発電機のモデル化

図1の系統図内のA点(最右連系点)で3φ4LG 事故が発生した場合での連系線送電電力最大化を行った。この時の発電機の内部位相角の動揺曲線は図3の通りとなる。

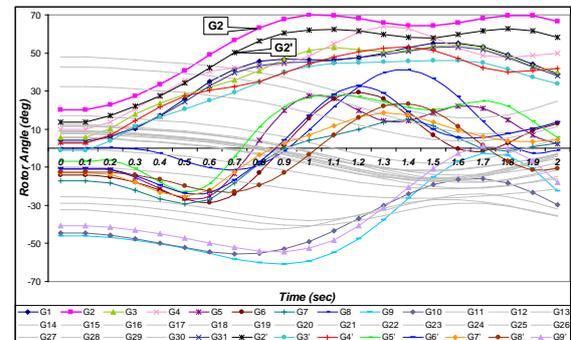


図3 発電機の内部位相角

図3の発電機内部位相角曲線のうち、G2の発電機の位相角がその制限値に到達していることが分かる。G2が連系線容量を制限している発電機であることが考えられる。

発電機に対して電源制限を行って安定度を向上させるとして、連系線容量の増分を求めた。これを、図4に示す。

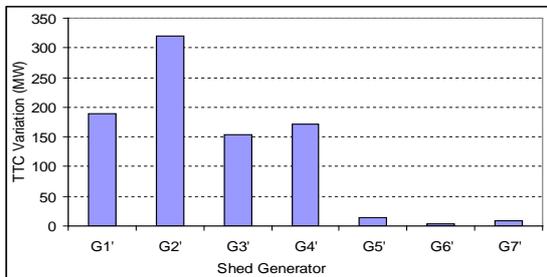


図4 電源制限による連系線容量の増加分

図4からわかるように、G2を電源制限することで最も連系線容量が増加していることが分かる。この条件で、G2の位相角制約に対するラグランジュ乗数の値は、-1.384であり、各発電機の最小値（絶対値での最大値）であることが分かる。したがって、本手法を用いることで、連系線容量に対する各発電機の安定度維持に対する感度を求めることができ、どの発電機（事業者）が安定度に寄与しているかを数値的に求めることが可能となった。

これらの計算を行うために必要とされる計算時間を表1に示す。

表1 計算時間

Case	Iterations	CPU Times (secs)
No Shedding	45	138.211
Shedding G1'	40	117.393
Shedding G2'	44	131.177
Shedding G3'	41	124.168
Shedding G4'	39	117.151
Shedding G5'	42	123.779
Shedding G6'	43	126.53
Shedding G7'	41	120.306

使用計算機は Intel Xeon 3.0 GHz コンピュータである。1つのシミュレーションケースで2分程度の計算時間がかかっている。そのため、複数の系統条件に対して本手法を適用するためには、並列計算機の導入が不可欠であることがわかる。ただし、約2分のシミュレーション時間はオフライン検討には十分なレスポンスタイムであるため、プログラム本体の並列化プログラミングを実行するよりも、プログラムを複数同時に実行できるインタフェースプログラムを利用すること

により、並列化が容易に実現可能である。

(2) 競争環境下での発電機起動停止計画問題

開発した手法の有効性を確認するため、プロトタイププログラムを作成した。実規模のテスト系統に対して実用的な計算時間で解を得るため、並列計算機で実行できるようプログラミングを行い、MPI インタフェースを用いたグリッド計算環境でシミュレーションを行った。

①シミュレーション条件

対象電力系統内にX, Y, Zの3社が存在するものとし、その電力系統がA, Bの2地域に分割されていたものとする。図5にシミュレーションに用いた系統を示す。

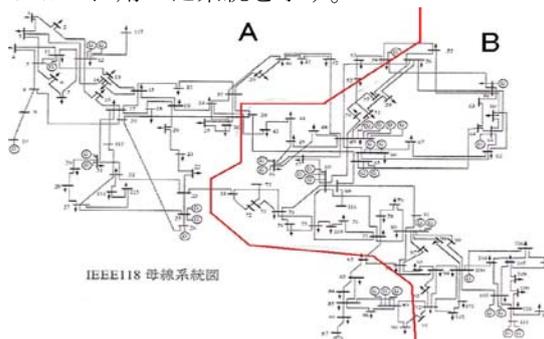


図5 シミュレーション系統

各社の需要・発電機の配置は以下のとおりとなる。

表2 競合3社の需要・発電機

	発電機		需要
	A	B	
X社	3機	9機	35%
Y社	6機	6機	35%
Z社	5機	7機	30%

図5の赤線で示されている境界で地域分割を行い、A-B間の線路潮流が規定範囲内に収まるようシミュレーションを行うものとした。

②シミュレーション結果

表3は潮流制約を適用する前と後の1時から12時までの線路の状態を示している。この線路の許容容量は500[MW]に設定されており、3時以外の線路は違反していることでラグランジュ乗数(LR乗数)が更新されていることがわかる。3時には制約が無い状態から500[MW]を超えていないのでラグランジュ乗数は更新されず0となっている。また線路占有率を見ると、ほとんど90%を下回っている。これは5, 6, 7時などラグランジュ乗数が他の時間帯に比べると高い時間帯の影響による発電機起動状態のため、低くなってしまっていると考えられる。

表3 線路潮流による制約結果

時間	制約無し	制約有り	LR乗数	線路占有率(%)
1	515	482	18	96
2	517	423	17	84
3	486	374	0	75
4	508	399	8	80
5	531	438	47	87
6	534	393	60	78
7	533	416	52	83
8	532	391	32	78
9	518	401	18	80
10	510	393	21	78
11	501	375	2	75
12	501	493	5	98

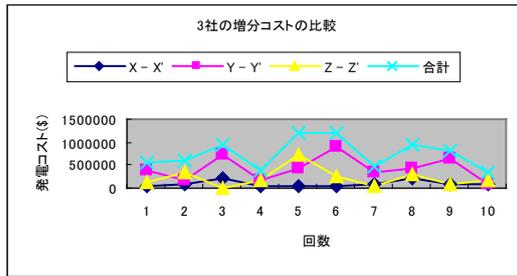


図6 3社の増分コストの比較

図6にラグランジュ緩和法のペナルティ協調に対する各社の増分コストを示す。3社の中でX社の変動が少ないことから、この系統状態ではX社に利益があることがわかる。これは、相対的に発電コスト関数が低いA地域にX社は発電機を12機中3機しか設置していないため、ペナルティ協調で増分コストがあまり変動しないと考えられる。逆にY社の増分コストは大きく変動しており、かなりの損失が発生している。Y社では同じA地域に発電機を12機中6機設置していることからペナルティに発電コスト関数が加算されることにより増分コストの変動が激しくなると考えられる。

(3) 本研究の成果のまとめ

本研究では、複数の託送が含まれる送電線運用問題に対して、安定度を考慮しつつ、その社会厚生を最大化する手法の提案を行った。提案手法の有効性を確認するため、プロトタイププログラムを作成し、実規模システムに適用した。提案手法を実用的な計算時間で実現するためには、複数の計算機をMPIライブラリを用いたインタフェースにより接続したグリッドコンピュータ上で実行するシステムを開発した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

H. Hamada, M. Maruta, J. Kubokawa, R. Yokoyama, “Effective Optimal Power Flow Solution with Transient Stability Constraints based on Functional Transformation Technique”, WSEAS Trans. on Power Sys., Vol. 2, No. 8, pp.195-201, 2007

L. Hakim, J. Kubokawa (2nd author), et. al. : “A Study on Generation Shedding to Total Transfer Capability by Means of Transient Stability Constrained Optimal Power Flow”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 344-355, 2009

[学会発表] (計10件)

Junji Kubokawa, et. al. “A Solution of Total Transfer Capability Using Transient Stability Constrained Optimal Power Flow”, IEEE PowerTech 2007, 2007年7月3日, Switzerland

丹羽, 久保川他: 「TSCOPFを用いたTTC計算のオンラインフィールド検証(その2)」, 2008年電気学会電力エネルギー部門大会, 2008年9月24日, 広島大学

久保川他: 「負荷減少を考慮したTSCOPFによるTTC計算」, 2008年電気学会電力エネルギー部門大会, 2008年9月24日, 広島大学

[図書] (計1件)

奈良宏一編 (久保川分筆): 「電力自由化と系統技術」, pp. 205-217 (担当分), 電気学会, 2008年

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保川淳司 (JUNJI KUBOKAWA)
 広島工業大学・情報学部・准教授
 研究者番号: 90225194

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし