電力システムの運用・計画問題

奈良　宏一

電力システムは大規模複雑なシステムであり，かつ，その振舞いは有機体にも似て時々刻々変化する動的なシステムである．電力システムの主要部は水力，石炭，石油，原子力といった発電所と発生した電力を輸送・分配するための送配電線，さらに送配電線の接続変更や電圧の変換を行なう変電所ならびに電力を消費する需要家(負荷)が複雑に組み合わさったシステムである．これらの設備は，エネルギー輸送に直接関係する部分であり，生物でたとえれば筋肉や血管網に相当する．一方，需要家に良質の電力（周波数・電圧一定で停電がない）を供給するために，送配電網にそって計算機，制御装置，通信設備などからなる制御網，すなわち，生物の脳や神経網にたとえられる装置群が設備されている．

このような電力システムは，設備が大規模なばかりでなく，交流による電力輸送の物理現象そのものが非凸・非線形であり，さらに各種制御装置の振舞いも非凸・非線形・不連続で，かつ，動的である．また，電力システムでは，大規模な電力貯蔵が不可能であって電力の発生と消費が同時に行なわれねばならず，さらに，全系で制御される有効電力の変化が局所的な無効電力潮流にも影響を与えるため，局所的な制御の可能性を考慮に入れた全系の制御が必要である．これらの制御を誤ると大規模な停電を引き起こし，社会的混乱をまねくことになる．

それ故，詳細な解析と適切な計画にもとづく慎重な運用が要求されるが，複雑なためその解析や計画を数学的に厳密に行なうことは一般に困難である．そこで，サブシステムに分割して問題を縮小化したり，問題に応じて簡略化されたモデルを用いることによって，運用・計画の指針を得ているのが普通である．

電力システムは通常，電力を発生して負荷中心まで輸送する送電システムと，負荷中心の変電所から需要家へ電力を供給する配電システムの大きく2つのサブシステムに分けられる．また各サブシステムはさらに多数のサブシステムより構成される階層システムとなっている．各サブシステムは，計画・運用・制御・経営などの観点から，本特集の他の論文にみられるように，じつにさまざまな形の複雑な問題を提供しており，ＯＲの実践の場として実例に事欠かないシステムであると言ってよい．そのため，古くから電力システムに関係する種々の問題へのＯＲ手法の応用について検討が行なわれてきている[1]．その当時に比べ現在は，電力システムをとりまく環境や計算技術・通信技術も進歩しており，とり扱われる問題やそのとり扱い方法も大きく変わってきている．

本稿に与えられた目的は，電力システムの運用と計画という観点から，ＯＲの応用として興味ある問題についてその概要と最近の動向を紹介することである．**表1**はこれらの問題を列挙したものであるが，与えられたスペースでこれらのすべてについて解説することは困難である．本稿では，現時点で確定したといえる解法が存在しない問題の中から，特に，数理計画的に興味ある最適潮流計算問題と，複雑で一般的なモデル化すら困難な事故時復旧操作問題の2つをとりあげて，電力システム運用計画問題の一面を紹介したい．

1. 最適潮流計算

電力システムにおける最適化問題のうちで古くから数学的に比較的きれいに表現できる問題として有名なものに経済負荷配分(Economic Load Dispatch:ELD)問題[2]がある．これは合計の電力需要 P_R が与えられた時，燃料費最小を目的として運転中の n 台の発電機の分担出力 P_i を決定する問題である．この問題は Lagrange の未定乗数を用いて(1)式のように定式化される．

$$\text{最小化}\quad L=F_1(P_1)+F_2(P_2)+\cdots\cdots+F_n(P_n) -\lambda(P_1+P_2+\cdots\cdots+P_n-P_R) \quad (1)$$

ただし，$F_i(P_i)$：発電機の燃料費関数

これを解くならば，各発電機は，

$$(\partial F_1/\partial P_1)=(\partial F_2/\partial P_2)=\cdots=(\partial F_n/\partial P_n)=\lambda \quad (2)$$

を満足するよう分担すればよいことになり，きわめて明解な解を得られる．しかしながら，系統構成が複雑になり，さまざまな種類の発電機が混在する最近の電力系統においては，送電線の電流容量や母線電圧，送電損失，

なら　こういち　茨城大学　工学部　システム工学科
〒316 日立市中成沢町 4—12—1

表 1　ＯＲ手法に関係する電力システムの運用・計画問題

	項　目	説　明
設備増設計画	長期需要予測	10～30年にわたる需要予測
	発電設備増設計画	水，火，原子力発電所建設計画
	送電設備増設計画	送電線，変電所および関連施設の建設計画
	無効電力供給設備計画	電圧維持のための無効電力供給設備増設計画
	配電設備増設計画	配電線，配電用変電所および関連施設の建設計画
	燃料計画	石油，石炭，ＬＮＧ，原子力燃料の長期燃料調達計画
電力システム運用計画	短期負荷予測	翌日の時間単位の負荷予測
	設備補修計画	１年程度の発電機，送電線等の定期および臨時補修計画
	河川流量予測	短期の出水予測
	貯水池運用計画	貯水池および水系の最適運用計画
	水・火力運用計画	水力・火力発電機の毎時の最経済運用計画
	発電機起動停止計画	翌日の最も経済的な運転発電機の決定（時間単位）
	系統構成計画	重負荷時，軽負荷時および停電作業時の送電系統または配電系統の最適構成計画
	電圧無効電力運用計画	無効電力供給設備の最適運用計画
	送電線運用目標計画	供給信頼性を考慮した各送電線の潮流限界の決定
	電力融通計画	経済性および信頼性を考慮した他社からの融通受電計画
	配電損失最小構成計画	配電損失が最小となるような配電系統の区間開閉器開放位置の決定
瞬時運用制御	最適潮流制御	発電機負荷分担制御，電圧無効電力制御を一括して行なう．
	信頼度制御	事故時にも電力供給が可能なよう系統を構成する停電予防制御，人畜および設備の被害を局限化するための事故時緊急制御，緊急制御完了後の事故復旧操作
	配電系統復旧制御	配電設備事故時の逆送計画・操作

燃料制約などを考慮したきめ細かい運用を求められており，上記の解では不満である．このような制約を考慮に入れた問題を最適潮流計算（Optimal Power Flow: OPF）問題と呼び，たとえば，次のように定式化される［３］．

ＯＰＦ問題

［目的関数］

$$\text{最小化} \quad \sum_{i\in G} f_i(P_i) \tag{3}$$

［制約条件］

$$\underline{P}_i \leqq P_i(V,\theta,T) \leqq \overline{P}_i (i\in G) \tag{4}$$

$$P_i(V,\theta,T) = P_{is}(i\in L) \tag{5}$$

$$\underline{Q}_i \leqq Q_i(V,\theta,T,C,R) \leqq \overline{Q}_i (i\in G) \tag{6}$$

$$Q_i(V,\theta,T,C,R) = Q_{is}(i\in L) \tag{7}$$

$$\underline{V}_i \leqq V_i \leqq \overline{V}_i \qquad (i\in N) \tag{8}$$

$$\underline{\theta}_i \leqq \theta_i \leqq \overline{\theta}_i \qquad (i\in N) \tag{9}$$

$$\underline{T}_j \leqq T_j \leqq \overline{T}_j \qquad (j\in B_T) \tag{10}$$

$$\underline{C}_i \leqq C_i \leqq \overline{C}_i \qquad (i\in N_C) \tag{11}$$

$$\underline{R}_i \leqq R_i \leqq \overline{R}_i \qquad (i\in N_R) \tag{12}$$

ここで，

$$f_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i}P_i + a_{2i}P_i^2$$
$$(i\in G,\ \text{燃料費を表わす凸２次関数}) \tag{13}$$

$$P_i(V,\theta,T) = \sum_{j\in N_i} P_{ij}(V,\theta,T) \tag{14}$$

$$P_{ij} = g_{ij}V_i^2 - V_iV_j\{g_{ij}\cos(\theta_i-\theta_j) - b_{ij}\sin(\theta_i-\theta_j)\} \tag{15}$$

$$Q_i(V,\theta,T,C,R) = \sum_{j\in N_i} Q_{ij}(V,\theta,T) - V_i^2(C_i-R_i) \tag{16}$$

$$Q_{ij} = b_{ij}V_i^2 - V_iV_j\{g_{ij}\sin(\theta_i-\theta_j) - b_{ij}\cos(\theta_i-\theta_j)\} \tag{17}$$

N：すべてのノード集合，　G　：発電機ノード集合
L：負荷ノード集合，　　B_T：変圧器集合
N_i　　：ノード i に接続があるノード集合
N_C　　：コンデンサ設備があるノード集合
N_R　　：リアクトル設備があるノード集合
P_i, Q_i　：発電機ノード i での注入有効・無効電力
P_{ij}, Q_{ij}：ノード i，j 間の有効・無効電力潮流
P_{is}, Q_{is}：負荷ノード i での注入有効・無効電力
$V=[V_i]$：電圧（絶対値）ベクトル
$\theta=[\theta_i]$：位相角ベクトル
g_{ij}　：ノード i，j 間のコンダクタンス
b_{ij}　：ノード i，j 間のサセプタンス
$T=[T_j]$：変圧器タップ値ベクトル

$C=[C_i]$：電圧調整用コンデンサのキャパシティブ・アドミッタンスのベクトル

$R=[R_i]$：並列リアクトルのリアクティブ・アドミッタンスのベクトル

$\overline{\ }$(上付のバー)，$\underline{\ }$(下付のバー)：上下限値を表す

上記のＯＰＦ問題で，(3)式は最小化すべき目的関数(発電機燃料費の総和）であり，(4)～(9)式は電力システムの回路方程式（潮流方程式），(10)～(12)式が無効電力（電圧）調整設備の制約条件である．無効電力調整設備は，通常，離散的に制御されるので，離散値として扱う場合には整数変数 y_{Tj}，y_{Ci}，y_{Ri} を次のように定義して，T_j, C_i, R_i を離散値とすればよい．

$$T_j=T_j^0+y_{Tj}\cdot\triangle T_j \quad (j\epsilon B_T) \tag{18}$$

$$C_i=C_i^0+y_{Ci}\cdot\triangle C_i \quad (i\epsilon N_C) \tag{19}$$

$$R_i=R_i^0+y_{Ri}\cdot\triangle R_i \quad (i\epsilon N_R) \tag{20}$$

ここで，T_j^0，C_i^0，R_i^0：T_j，C_i，R_i のベース値

$\triangle T_j$：１タップ当りのタップ比

$\triangle C_i$：コンデンサの１ユニットのアドミッタンス

$\triangle R_i$：リアクトルの１ユニットのアドミッタンス

y_{Tj}，y_{Ci}，y_{Ri}：ユニット数を表わす整数変数

なお上式はセキュリティ制約などの複雑な制約条件を除いた単純なものである．セキュリティ（Security）制約とはシステムに事故が発生し，一部の設備が使用不能となった場合にも停電なく電力供給を継続可能なよう系統を構成するための制約をいう．系統の設備が使用不能となれば事故ケース毎に系統構成が変わって(4)～(12)式の制約条件式の形が変わるので，厳密にセキュリティ制約を加えれば(4)～(12)式の数が（考慮する事故の数＝数十～数百）倍に増えることになる．さらに on-line 使用の場合，この問題の解は数十秒毎に更新されねばならない．

上記(1)～(12)式の問題に対して古くからさまざまな解法が提案されてきている[4-8]．古くは Kuhn-Tucker 方程式を Newton-Raphson 法で解く接近法［9］から始まって，準ニュートン法[10]，2次計画（ＲＱＰ）法[11]，非線形プログラミングパッケージＭＩＮＯＳの直接利用，ＳＬＰなど，考えられるあらゆる解法が試みられてきている．一方，電力システムの通常の運用状態においては $V_i≒1.0$，$(\theta_i-\theta_j)≒0$ としても大きな誤差が生じないので，(4)，(5)式を，$P'_i(\theta)$，(6)，(7)式を，$Q'_i(V,T,C,R)$ と線形式にして，P（有効電力）に関する変数と Q（無効電力）に関する変数を分離して近似解を求める手法の高速性が注目されている．この近似を用いた手法としては，目的関数の２次式を区分線形化し，線形計画法を適用する[12]試みや，線形回路の重畳法則の適用によって，セキュリティ制約条件を含めた問題を on-line で利用可能な時間内で解く手法[13]などが報告されている．これらの手法の特徴については文献[６]に比較検討されているので，ここでは，これら手法の中から最近の動向を踏まえた手法として，Ｔ，Ｃ，Ｒを離散値として扱った解法[３]について簡単に紹介する．

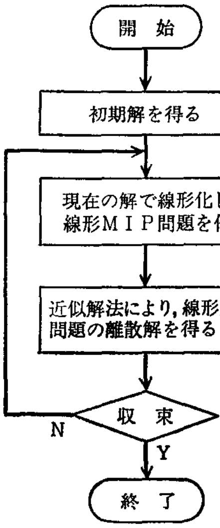

図１ 設備の離散調整を考慮した最適潮流計算法

この手法ではＭＩＰの近似解法にＳＬＰの概念を加えた解法をとっている．まず図１に示すように，任意の方法で初期解を得たのち，その点で(3)～(20)式を線形化して，線形ＭＩＰ問題を作る．この線形ＭＩＰ問題は次のような近似解法[14]で解かれる．すなわち解が現在の値から大きくずれることを防ぐために変数の変域を決定したのち，ＬＰ連続緩和問題を解き，整数変数を整数値に四捨五入する．解が実行不能であれば，単体表の非基底に位置する整数変数を，実行不能量が減少する方向へ動かし実行可能としたのち，さらに目的関数減少方向へ整数変数を動かしていく．得られた解の非線形制約式に対する実行不能量が１回前の繰り返しより減少するまで変数の変域を狭めながら上記近似解法を繰り返したのち，再び新しい近似点で線形化し直し，解が収束するまで上記手続きを繰り返すことによって近似解を得ている．$N=135$ の時のこの手法の演算時間は大型機（30ＭＩＰＳ）で40～50秒である．

ＯＰＦ問題は数学的記述が容易なため，さまざまな制約条件を加えた形でさまざまな方法で解く試みがなされてきており，1960年代から今日までの30年間に学会論文

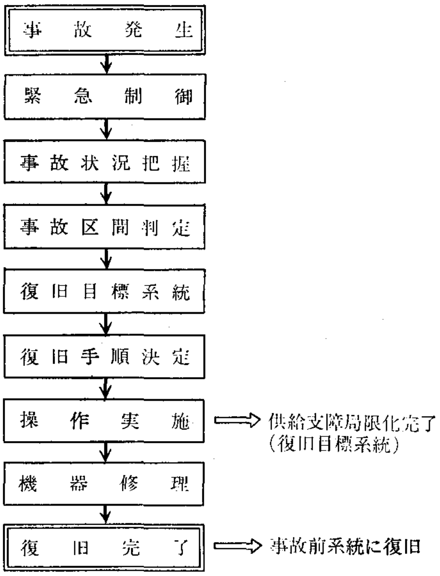

図 2　電力システム事故時の復旧手順

誌だけ数えても数百に上る論文が発表されている[4-7]. しかしながら現在の計算機の能力をもってしてもセキュリティ制約や離散変数などを考慮して正確な解を得ることはきわめて困難である. 現在実用を目的とした高速近似解法の開発にこの分野の研究の主力が注がれている.

2.　電力系統の事故時復旧操作手順決定問題

電力システムに事故が発生すると, 人畜および設備に対する被害を局限化するための緊急操作を行なったのち, 供給支障を低減するための復旧操作を**図 2** に示すような手順で決定し実行する[15]. 図 2 で, 緊急操作終了後の状態から事故設備を使用せずに供給支障量を最小化するような復旧目標系統を定め, それを実現するまでの操作手順を決定する問題を復旧操作手順決定問題と呼んでいる. この問題はモデル化も含めてきわめて困難な問題として知られている. この理由の 1 つは, 制約条件として(4)～(20)式の他に再送電許容回数, 発電機の試送電能力, 並列可能変電所, 変圧器励磁突入電流, 負荷送電許容量, 所内電源の確保と発電機の出力上昇率などを考慮したうえで, 系統切替, 発電調整, 負荷送電, 電圧調整などの操作を適切な順序で繰り返して, なんらかの基準に照らして最適に目標系統に到達する必要があるためである. 何らかの基準とは, 事故発生から供給支障解消までの「供給支障電力量 (MWH) 最小」, 「全負荷復旧までの時間最小」, 後に述べる「停電損失最小」などさまざまな提案がある. さらに, 接続変更操作のつどシステム構成が変化して制約条件自体が変わるため, 制約条件や操作を数式で表現することはきわめて困難である. それにもかかわらず, 上記復旧操作の概念のモデル化をあえて試みるならば, 次のように表現できるという報告がある[15].

いま x_s を事故直後の系統の状態, x_f を復旧完了後の系統の状態を表わす変数とすると, 復旧過程は**図 3** に示すように $x^{(0)}=x_s$ から始まり, 状態 $x^{(i-1)}$ に対して開閉操作や発電機出力調整などの系統操作 U_i を実施することによって状態 $x^{(i)}$ に至るというステップを繰り返して最終状態 $x^{(n)}=x_f$ に至るまでの一連のステップ

$$\begin{aligned} &x^{(0)}=x_s \\ &x^{(1)}=U_1 \cdot x^{(0)} \\ &x^{(2)}=U_2 \cdot x^{(1)}=U_1 \cdot U_2 \cdot x^{(0)} \\ &\vdots \\ &x^{(n)}=U_n \cdot x^{(n-1)}=\cdots\cdots=x_f \end{aligned} \tag{21}$$

として表現できる. すると, 復旧操作手順決定問題は, 目標を「供給支障電力量 (MWH) 最小化」とすると,

[目的関数]

$$\text{最小化}\quad F=\sum P(x^{(i)}) \cdot t(U_i) \tag{22}$$

[制約条件]

$$G(x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots\cdots, x^{(n)}, U_1, U_2, \cdots\cdots, U_n)=0 \tag{23}$$

$$H(x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots\cdots, x^{(n)}, U_1, U_2, \cdots\cdots, U_n)\leqq 0 \tag{24}$$

と表現できる. ここで $t(U_i)$ は系統操作 U_i に要する時間である. しかし上式で U_i にはいくつかの異なった操作を組み合せて同時並行的に行なう操作も含まれねばならない. また一般に U_i と U_j は独立ではなく, マルコフ性もない. 関数GとHにはもちろん(4)～(20)式の制約も含まれるが, GとHの関数形の一部は U_i が組合せ的に変わる値をとるためきわめて複雑な形となり, 各組合せの場合に分けて表現しなければ関数形を特定できない.

よって, (22)～(24)式のままでは問題を具体的に定式化することも, 解くことも不可能であり, 部分問題への分解やエキスパートシステムの適用などさまざまな技巧を駆

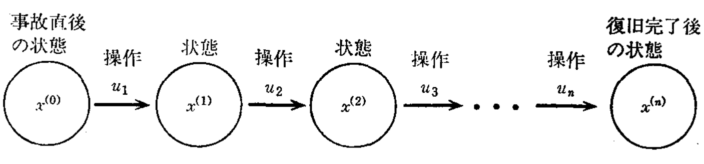

図 3　復旧操作の概念

使して解を得る試みがなされている[15-21]．以下，基幹系統の復旧操作手順決定にエキスパートシステムを適用した例，負荷復旧順序決定の部分問題を割当問題に縮約して解いた例について概説しよう．

（1） エキスパートシステムの応用

基幹系統（大容量発電機等が接続される超高圧系統）が壊滅した場合，その復旧手順決定はまさに(22)～(24)式をそのまま解くことに相当する．それ故，この復旧手順決定は，従来，経験豊かな運転員の技に頼らざるを得なかったものである．文献[21]では，エキスパートシステムと数値計算によって，基幹系統壊滅時の復旧操作手順決定のガイドを運転員に与える手法を提案している．

この手法では，まず，全体の復旧手順を，

(1) 事故前系統設定
(2) 事故設備判定
(3) 復旧前提条件設定
(4) 復旧方針立案
(5) 復旧準備操作方針立案
(6) 系統拡大方針立案
(7) 復旧操作実行

の7つのフェーズに分けて各フェーズ毎に合計200のプロダクションルールを与えている．この手法の特徴はルール中でヒューリスティックアルゴリズムを呼び出しており，さらにこのアルゴリズム中で数理計画的手法をとっていることである．たとえば復旧方針立案フェーズ中の復旧目標系統決定はヒューリスティックアルゴリズムによっておりその中の過負荷解消のための発電調整では(4)，(5)式の制約下で次式を目的関数とする非線形計画問題を解く((6)～(20)式を考慮しない準最適解)としている．

$$最小化 \quad \sum_j \max\{(P_{fj}(V,\theta,T)-\overline{P_{fi}}),\ 0\} \tag{25}$$

ただし，P_{fj}：線路jの有効潮流

この例ではOPS83ならびにFORTRANを用いたプロトタイプで10～20秒程度で実用に耐え得る支援を得られたとしているが，まだ改良も必要であるとしている．

（2） 負荷復旧順序決定問題

一方，数理計画的な接近を行なうには全体問題を復旧方針決定[17]，負荷復旧順序決定[18]，負荷復旧操作手順決定[16,19,20]など定式化しやすい小規模部分問題に分けて準最適化を得る方法をとるのが普通である．ここではこのうち負荷復旧順序決定問題をとりあげよう．

大規模停電時に停電負荷は発電機出力の立上りに応じて適量ずつ投入されねばならない．この投入順序は組合せ的問題を解けば決まるが，それによって社会的影響が異なる．この社会的影響を評価するための基準を決めることは困難な問題であるが，停電により社会が被るであろう損失をアンケート等で予測し，これを停電損失として定義して，この最小化を目的として負荷の復旧順序を求めることが可能である．種々の調査によれば，停電損失は停電継続時間や，規模，回数，原因などの要因によって指数的に増加することが知られているが[22]，停電継続時間が短い場合，これを2次式で近似して，

$$F=(a+dt+ct^2)\cdot L \tag{26}$$

ただし，F：停電損失，t：停電継続時間，L：負荷の大きさ，a, b, c：負荷種別によって決まる定数

と定義きでる．(26)式の値はLとtがわかれば決まるので，負荷を適当な単位量$\triangle L$でn個に分割し，発電機出力が単位量増加する毎に分割負荷（$\triangle L$）を復旧していくものと考える．発電機の時刻―出力特性は既知であるから，分割負荷iが時刻u_iに復旧される場合の停電損失をF_{ij}で表わせば，負荷の停電損失の総和を最小とする問題は次のように定式化できる．

［目的関数］

$$最小化 \quad F=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} F_{ij}x_{ij} \tag{27}$$

［制約条件］

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij}=1 \quad (j=1,2,\cdots\cdots,n) \tag{28}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}=1 \quad (i=1,2,\cdots\cdots,n) \tag{29}$$

$$x_{ij}\in\{0,1\}$$

上式で，x_{ij}は分割負荷iが時刻u_jで復旧される時1，その他で0をとる0-1変数であり，(28)，(29)式はすべての分割負荷が一度だけ復旧され，発電機の単位負荷量立上り毎に1つの分割負荷だけが復旧されねばならないことを示している．すなわち，問題は単純な割当問題に縮約されたことになり容易に解ける．文献[18]では，Ford-Fulkerson法を用いる解法が報告されている．なお，この問題の解は部分問題の解にすぎず，送電線過負荷や電圧異常などが考慮されてないことからもわかるように，得られた復旧順序で実際に復旧可能である保証はないことに特に注意されたい．

さて，近年，大規模事故が減り，復旧経験をもつ運転員の数がきわめて少なくなってきたため，大規模事故発生時に運転員に適切な指示を与えることが早期復旧のためには必要である．それ故，事故時復旧操作手順決定問題は電力システムの重要な課題になってきている．今後

しばらくは，エキスパートシステムと数理計画法を融合した手法による接近法がとられるであろうが[23]，一般的なモデル化すら困難な問題でもあり，多くの分野の研究者のさまざまなアプローチによって実用に耐え得る解法が早い機会に開発されることが期待されている．

3. あとがき

電力システムの運用・計画分野にはまだ確定した解法がない問題が数多い．このような問題のほとんどが本稿で紹介したように大規模で組合せ的要素をもっている．効率よい解法がないので，ＯＲ技術者にとっても興味深いが，電力系統の拡張とともにこのような問題の種類や数も増えその複雑さも増してきている．効率よい解法を得るには電力システムの特徴をうまく生かすことが鍵となろう．このような複雑な問題に対しいわゆる先端技術分野を含めた多くの研究分野からの貢献を期待したい．

文献

[1] 日本ＯＲ学会研究専門委員会電力部会：電気事業における数理計画法（昭46）

[2] L. K. Kirchmayer: Economic Operation of Power Systems, Wiley (1958)

[3] 範，青木他：「設備の離散的調整を考慮した最適潮流計算法」，電学論Ｂ，第111巻，第４号（平３）

[4] A. M. Sasson & H. M. Merrill: "Some Application of Optimization Techniques to Power Systems Problems", Proc. of the IEEE. Vol.62, No.7 (1974)

[5] H. H. Happ: "Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-96, No.3 (1977)

[6] S. N. Talukdar & F. F. Wu: "Computer-Aided Dispatch for Electric Power Systems", Proc. of the IEEE, Vol.69, No.10 (1981)

[7] M. Huneault & F. D. Galiana: "A Survey of The Optimal Power Flow Literature", IEEE Trans. PWRS, Vol.6, No.2 (1991)

[8] B. Stott, et al.: "Security Analysis and Optimization", Proc. of the IEEE. Vol.75, No.12 (1987)

[9] A. H. El-Abiad & F. Jaimes: "A Method for Optimum Scheduling of Power and Voltage Magnitude", IEEE Trans. PAS. Vol. PAS-88, No. 4 (1969)

[10] S. N. Talkudar & T. C. Giras: "A Fast and Robust Variable Metric Method for Optimum Power Flows", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-101, No. 2 (1982)

[11] J. S. Lipowski, et al.: "Solution of Optimal Load Flow Problem by Modified Recursive Quadratic-Programming Method", IEE Proc., Vol.128, Pt. C. No.5 (1981)

[12] O. Alsac, et al.: "Further Developments in LP-Based Optimal Power Flow", IEEE Trans. PAS, Vol. 5, No. 3 (1990)

[13] A. Monticelli, et al.: "Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling", IEEE Trans. PWRS. Vol. PWRS-2, No. 1 (1987)

[14] T. Ibaraki, et al.: "A Heuristic Algorithm for Mixed-Integer Programming Problem", Mathematical Programming Study, Vol.2 (1974)

[15] 電力系統の事故復旧操作調査専門委員会：「電力系統の事故時復旧操作」，電気学会技術報告（Ⅱ部）第354号（平２）

[16] 鈴木他：「２次系統の復旧時自動操作論理」，電学論Ｂ，第97巻，３号（昭52）

[17] R. J. Kafka, et al.: "System Restoration Plan Development for a Metoropolitan Electric System", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, No. 8 (1981)

[18] 奈良他：「停電損失を考慮した事故時負荷復旧順序の決定法」，電学論Ｂ，第101巻，第２号（昭56）

[19] 松本，坂口：「知識ベースに基づく電力系統復旧方式の決定法」，電学論Ｂ，第103巻，第３号（昭58）

[20] 奈良他：「ループを含む系統へ適用可能な復旧時自動操作論理」，電学論Ｂ，第104巻，第３号（昭59）

[21] 薬科他：「基幹電力系統における事故復旧操作ガイダンス方式」，電学論Ｂ，第109巻，第２号（平１）

[22] C. A. DeSalvo, et al.: "The Application of Planning Criteria to the Determination of Generator Service Data by Operating Gaming", AIEE Trans. PAS Feb. (1960)

[23] M. M. Adibi & R. J. Kafka: "Power System Restoration Issues", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2 (1991)