21世紀の電力システムの展望と系統余力から見た発送電の均衡性

正員 高橋 一弘*

A View of the Power System in the 21st Century and a Concept of System Margin Applied to Capability Coordination between Generation and Transmission Sectors

Kazuhiro Takahashi*, Member

In recent years, various inexperienced events with uncertain factors, such as a competitive electricity market, tend to gradually take place surrounding the actual electric power industry. Towards the mid-21st century, most of these tendencies, keeping steady pace with global trends, will become more prominent and still widely increased in Japan. Under such a changing and ambiguous situation of these days, it is of great significance to establish a national view of the ideal electricity supply in the 21st century. To cope with the relevant technological problems from the standpoint of sustainable development is a challenging and timely task for today's power system engineers.

This paper provides fundamental requirements for the future adequate power system especially in terms of supply capability coordination between generation and transmission sectors. It is noted that a newly proposed concept of "System Margin" is utilized as an evaluation index for the effective use of existing system components. A numerical example incorporating the suggested ideas is then presented for a simple trunk power system model. Finally, concluding remarks are shortly summarized, and a few related considerations and further research study topics are also supplemented.

キーワード：電力系統，供給能力，系統余力，電源と流通の協調，設備の有効活用

Keywords: power system, supply capability, system margin, system coordination between generation and transmission, effective use of system components

1. はじめに

20世紀のわが国の電力系統は著しい発展を遂げつつ、時代に応じて堅実な電力供給を維持してきた。しかし、20世紀が漸く暮れようとする頃から、従来には経験されなかった新しい事象が徐々に現れ始めてきた。グローバル化の波のインパクトもあって、電力供給を巡る情勢は次第に多様で混沌とした様相を呈してきた。電気エネルギーの社会的役割りが今後ますます高まるにつれて、電力系統に係わる課題も一段と多岐に亘り複雑でかつ厳しくなっていく。

しかしながら、昨今の激しい変化の状況にあって、このままでは技術の面からの見方が逐次一方的になおざりにされてしまう恐れがある。21世紀へのスタートを切ったこの時機に、わが国の電力供給の将来イメージを超長期的な視点から把握し、望ましい電力系統の要件をひとまず工学的な立場から明確にしておくことが重要である。

本稿は21世紀の電力系統を考えるに当たって、主に電源部門と流通部門の整合性の観点から眺めたものである。すなわち、既存の流通部門の供給能力を有効に活用して、全系一様に適度のゆとりを保ちつつ、電源部門を順次拡充していくことを論じている。供給能力に関しては、電力系統の計画基準に採用される安全運用の条件のほか、電力系統に固有の性質である発送電の一体性に基づいている。また、電源と流通の均衡性の評価には、先に提案した系統余力⁽⁷⁾の考え方をを用いた。系統余力とは電源部門の供給予備力に相当する概念であり、流通部門の持つゆとりの過不足に関して定量的な評価を行う際に役立てられる。

以下本稿では、まず、わが国の電力系統を巡る最近の動向と今後の進展について概観し、これらの状況が21世紀の電力系統のインフラ整備に及ぼす問題について触れてみる。次に、こうした情勢変化に対処するため、電源と流通との協調を主軸にした考え方を示し、具体的な分析手段として系統余力による指標を導入する。以上に基づき、簡単なモデル系統に対して本稿で提示する方法を適用し、その有効性について検証する。最後に、今後検討すべき研究テーマと関連事項について若干の考察を補足する。

* (財) 電力中央研究所

〒201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1

Central Research Institute of Electric Power Industry
2-11-1, Iwato Kita, Komae 201-8511

2. 21 世紀の電力系統を巡る新しい動き

わが国の電力供給に関わる今後の状況変化は、さまざまな側面から捉えることができる。本稿では以下の3つの視点から眺めてみる。ひとつは電力需要の伸びの鈍化傾向である。2つ目は電力市場の複雑化への流れである。3つ目は社会の人々の関心の高まりである。21世紀を迎えて暫くの間、こうした新しい動きは確実に加速されていくだろう。まず最初に、本稿における問題提起として、これらの変化が今後わが国の電力系統のインフラ形成に対して与えるインパクトとそれへの対処について考えてみる。

〈2・1〉 電力需要の成長の鈍化 バブル反動の景気低迷にもよるが、堅実な伸びを続けてきたわが国の電力需要が、近年初めて停滞の様子を示してきた。この傾向に関連して、日本の人口増加が数年以内に停止することが注目される。経済活動も長期的には成熟に向かうだろう。産業や社会のエネルギー使用の仕方も安定な形に定着していく。

したがって、わが国の電力需要はいずれ飽和状態に落ちつく。先に当所では、21世紀中葉（2030年頃）に日本の電力需要が一定の上限に接近する（1995年の1.5倍程度）との見通しを提起した⁽¹⁾。もちろん、飽和時点までは依然として、着実な供給への取り組みは継続していかなければならない。しかし、こうした飽和傾向は世界の持続的発展から見れば、むしろ好ましい現象であると言えよう。

さて、ここで注意すべきことは、わが国の需要が頭打ちになるにつれて、電力系統も一定の規模に近づいていくことである。成長が停止した時点では、電力系統はある状態に到達しそのまま固定されてしまう。したがって、21世紀に目指すべき理想的な電力系統のイメージを、事前にさまざまな側面から明確に把握しておく必要がある⁽²⁾⁽⁴⁾。

ここでは、そのような電力系統の技術的な要件として、全系に亘り著しく過剰なゆとりを持つ部分が残存しないこと、さらには供給能力のゆとりに偏りがなく、できる限り一様であるべきことを挙げておく。こうした収束状態では、一旦形成された電力系統は簡単に変更ができない。つまり、設備拡充プロセスの軌道修正は、高度成長時代では容易だったが、ゼロ成長下では極めて困難になるからである。もし、有効に使用されない設備があれば、そのまま寿命が尽きるまで長期間に亘り残り続けることになる。

〈2・2〉 電力市場の複雑化 電気エネルギーの技術者の多くが一抹の疑念を抱きつつも、次第に電力自由化による競争原理という世界的な潮流に乗らざるを得ない情勢になってきた。もし今後さらに市場開放が進めば、全体の秩序や規律より自らの行動を優先するIPP（独立系発電事業者）や託送電力取引者も多数参入してくるだろう。こうした競争者の間では、相互の情報伝達や意志疎通が従来よりも滞っていくことは必然であり、正確に全体状況を捉えることは自ずと困難になっていく。つまり、これまでのような集中管理型の意思決定のもとでは扱い難い、曖昧で不明確な要素が徐々に増大していくことになる。

電力自由化のほかにも、従来では未経験だった事象によって新しい形の不確実性が誘発されていく。例えば、社会の仕組みや生活のスタイルが多様になれば、日々の負荷変動に予測し難い要素が増す。量的に限られるが、太陽光発電など不規則な出力特性を持つ自然エネルギー発電が増加する傾向もある。需要地近傍に熱併給発電が普及すれば、日間の負荷パターンにはランダム性が加わっていく。

こうした新しい不確実ファクターの増大に伴って、今後の当面の手段として、これらの不測事態に安全に対処するための供給能力のゆとりが必要になる。つまり、電源部門では日々の運用における運転予備力をやや大き目に確保しなければならなくなる。さらに、流通部門では地点ごとの需給インバランスも不規則になるため、ゆとりの配置などについても新しい対応が必要になるだろう。

〈2・3〉 社会からの関心の高まり この背景には、特に環境問題に対する人々の意識や態度の変容が係わっている。わが国は国土が狭隘で人口も稠密であり、かつ地震など自然災害も多い。また電力施設は巨大インフラであり、周囲の自然や地域にある程度のインパクトを与える。一般に環境問題は発電面と立地面とに分けられるが、ここでは後者（設備形成）の視点から今後の動向を眺めてみる⁽³⁾。

さて、地域の人々の関心の主な対象は従来、景観や安心など身近な生活問題（環境との調和・共存）に向けられてきたが、将来は社会資本や公共施設の見直しなど国ベースでの総コスト抑制を意識した動き（環境の整備・創造）も加わっていく。21世紀の電力系統の形成においては、人々の意思がさらに大きな支配要因となる可能性がある。

とりわけ大規模の設備投資は確実に抑制されるだろう。そこで、時間面では既存設備の長寿命化を図りつつ、空間面では万遍なく個々の設備の能力を極力発揮させるといった考え方（Asset Management）が基本になっていく。

電源部門では、飽和需要までの増分に相当する所要容量は確保しなければならないが、新規地点に大幅な期待はできない。代替として、既設地点での増設や老朽施設の改修（性能向上）つまりリプレース（リパワリング）により充たされ、用地当たりの出力密度は増大していく。自由市場からの調達分についても同じ条件である。大容量ユニットの導入は規模の経済性の点で不利になる。また、21世紀では小規模電源がある程度（当所の予測⁽¹⁾では1割程度）が期待され、主に需要地近傍に補完的に配置されるだろう。

一方、流通部門でも長距離の基幹系統の新設は一部の地域を除き厳しく制約される。負荷ルート（供給系統）、電源ルートは必要な区間に限り部分的に増強（建替）される。概ね流通設備の性能は既に限界に近いので、専ら保守管理の徹底により長寿命化が図られる。同時に、系統面からは既存設備の空き容量の活用方策が採られる。その第一の手段が個々の設備の運用条件の見直しである。次が、全系から見た系統構成の変更であり、広域的な系統切替も含まれる。さらには、能動性など革新機能を持つ系統制御装置が限定的ながら導入され供給能力が強化されていくだろう。

3. 電力系統における供給能力の考え方

前章では、電力系統を巡る状況変化が今後のインフラ形成に与えるインパクトを概観した。これを受け本章では、まず理想的な電力系統に必要な条件について総括し、関連して供給能力のゆとりの持つ意義について考える。

〈3・1〉理想的な電力系統に必要な条件 前章の主要事項を集約すれば、以下のような記述が得られる。

(1) 21世紀には電力需要が飽和し、電力系統も一定の形態に収束していくため、わが国としての理想像を見極めておくべきである。そのために望ましい技術的要件のひとつは、過剰なゆとりを持つ設備を残存させないことである。

(2) 今後は競争市場など、各種の新たな不確定要素が増大していくため、日々の安全な系統運用に必要な判断情報が曖昧になる。このためのリスク対応として、全体に亘り一定レベルを満たす供給能力のゆとりが必要になる。

(3) 大規模インフラの導入は極力抑制されるため、用地取得や資金調達は停滞する。増設電源の多くは中容量ユニットとなり、一部は需要地の小規模分散電源で補完される。一方、流通部門では特に基幹系統の新設が困難になる。

(4) 総じて、今後は既存設備の有効活用が重視される。電源部門は既設地点の増設や改修で賄われる。流通部門では、新規拡充が抑えられ設備の長寿命化が図られると同時に、既設設備の空き容量が積極的に利用されるようになる。

(5) つまり、21世紀の電力系統の形成の方向は、リスクとコストを両立させながら、ある理想像を目指していくことにある。本稿では、その重要手段のひとつとして、電源部門と流通部門の均衡性（発送電の協調）に注目する。

(6) そのため、流通部門が持つ供給能力のゆとりに関してコンセプトを深めておく必要がある。もし、ゆとりの過不足の程度を示す共通の指標があれば、流通部門における過剰な部分の偏在さの度合、新規の不確定要因に備えるべき対応分（予備力）、有効活用できる既存系統の空き容量などに関する定量的な分析に役立つことになる。

〈3・2〉供給能力のゆとりの持つ意義 ここでは、電源部門および流通部門がそれぞれ供給（発電・送電）し得る能力（供給能力）およびその余裕量（ゆとり）に関して、概略的な意義と留意すべき事項を述べておく⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

(1) 電力供給は短時間の停止でも社会に重大な影響を及ぼす場合がある。そこで、比較的小さな異常事態ならたとえ発生が想定されても、原則的に他の設備のバックアップにより通常機能が保持され供給支障が避けられる仕組みになっている。そのため、予備の代替設備など瞬時に応動可能な出力を待機させ、異常時には直ちに発動させている。ここには緊急時の応答が極めて迅速かつ確実であるという電気特有の性質が活かされている。他の対応手段として貯蔵装置もあるが、電気の直接の大量貯蔵は効率性や経済性に不利があり、現在は部分的な採用に限られている。

(2) こうした観点から、一般に電源部門および流通部門とも個々の設備の容量には、一定の許容範囲のもとで想

定されるすべての比較的軽微な設備の異常事態に際しても、安定な系統運用（安全運用）を確実に保障することのできるリスク対応分（最低限の担保分）が折り込まれていなければならない。しかも、この保障はあらゆる運用条件（需給状態）のもとで有効でなければならない。

(3) 次に、電力系統の供給能力のゆとりの用語について述べる。ここでのゆとりとは、ある設備の異常事態に際して、その時の需給状態から上記の安全運用の限界まで増大できる総需給量の大きさを意味する。ゆとりの存在によって、ある程度の想定外の異常事態に際しても対処が可能となる。また、ゆとりの大きさは時々刻々の需給状態に応じて変化する。電源部門では、需要のピーク時や補修停止の期間では小さくなる。一方、流通部門でもこのような傾向を示すが、地理的な需給分布にも影響され、概してその地点の潮流が大きい時はゆとりの値は小さくなる。

(4) 従来は、ゆとりがマイナス側（不足）の場合、つまり安全運用の限界逸脱に関心が向けられていた。実際の電力系統の計画業務では、確率論的方法と組み合わせて、専ら供給信頼度の評価に応用されてきた。電源部門では供給不足の見込み、流通部門では停電頻度の予測などに用いられている。一方、プラス側（余剰）のゆとりは、電源部門に限られるが、供給予備力として実用されている。しかし、流通部門ではプラス側を扱った考え方は未だ整っていない。

〈3・3〉流通部門の供給能力の扱い上の問題点 従来から流通部門においても供給能力のプラスのゆとり、つまり電源の予備力に相当する概念の導入が望まれていた。しかし、これに関した研究は現在まで、筆者らの論文⁽⁷⁾⁽⁸⁾のほか、電圧安定性や定態安定性から見た安全運用の限界、最近では電力市場の自由取引に絡んで2地点間の託送可能量（Available Transfer Capability, ATC）などの事例が報告されている程度である。議論の主流も未だ確定論的アプローチに基づいている段階にある。

さて、電源部門の供給能力は全系一括の1次元の数値で示され、算定も比較的容易である。個々の発電設備の可能な出力を合成するだけで済むからである。しかし、流通部門の場合は各種の設備が網状に接続された面的構造となるため、地点ごとに固有の値を取る。この結果、供給能力の表示が多次元になり、算定も自ずと困難になることは不可避である。本稿では今回この点の解決（算定の効率化など）を直接対象にはしていないが、以下にこの問題の困難性に係る基本的な理由を2つ挙げておく。

(1) まず、この問題の背景のひとつは、算定ケース数が多いことである。前述のように、流通部門では正常時は未使用でも異常時の発動に必要な能力は潜在的に用意しておかなければならない。そこで、一般に計画基準として採用される（n-1）ルールに従って、どのひとつの構成要素の脱落（単一事故）が想定されても、必ず安全運用が保障できることを個々に確認するチェック（Contingency Analysis）が行われる。しかも、これを年間の複数の代表時点を対象にする場合もあり、算定ケースは膨大な数に達する。

(2) 2つ目は、個々の保障の確認自体に要する手間の問題である。これは電力系統に固有な特性である発送電の一体性（個々の要素が有機的に互いの動作を支配し合う性質）と呼ばれる現象に起因している。この性質は電気エネルギーの輸送ネットワークに特有のもので、交通網などと比較して、流れの相互の連動作用が強固で迅速かつ広範である点に特異性がある。そのため、例えば流通部門の個々の区間の空き容量が十分あっても、それらを直列した経路に、電源部門の要求する出力に見合った流れを充足させることができない場合がある。落雷など外的擾乱を受けた際には、さらに過渡的な電力の動揺現象を伴う。状況によっては遠方まで波及し、広域に亘り安定運転が阻害される。これらの現象解明には、発送電を有機的に一括して個々の構成要素および相互の動的特性を数式化した大規模な連立の非線型微分方程式を解く必要がある。その理論は確立されているが、実際の求解に多大な労力を要している。

4. 流通部門における系統余力の概念

この章で提示する系統余力 (System Margin) とは、ある運用状態において、ある想定事故に対する流通部門が持つ供給能力のゆとりを表す。これは想定外の異常事態に対しても安全運用を一部保障する余裕量を意味する。

〈4・1〉 系統余力の算定アルゴリズム まず、系統余力を求める基本的なアルゴリズムを示す。以下は理解を容易にするため単純化したアルゴリズムであり、便宜的に5つの手順に分割して掲げておく。

【手順-1】 対象となる電力系統の構成条件と設備条件を設定する。例えば、ある計画年度の基本案や代替案の電力系統、またはある変則的な運用状態の電力系統などが対象。個々の設備の接続状態と特性諸元を与える。

【手順-2】 基準の運用状態の需給条件を設定する。例えば、ある計画年度の年ピーク時点、主要な電源が解列された特殊な時点の運用状態など。場合により、年間の代表的な複数個の時間帯の需給条件を順次設定する。

【手順-3】 手順-2の基準の需給条件から、所与の需給増加ルール（個々の電源容量と負荷需要を一律に増大）に従って、徐々に需給量を適当な刻み巾で増加しながら、軽潮流から重潮流の順に複数の潮流状態を準備する。

【手順-4】 想定事故の地点を設定する。一般には (n-1) ルールによる単一事故（2回線送電線の片回線故障など）である。すべての想定事故の地点を順次対象にする。

【手順-5】 手順-3で準備された複数の潮流状態を次々に設定して、安全運用の保障チェックを行う。ここでは、手順-4で与えられた地点につき、以下の4通りの系統特性の面からチェックする。これを、ひとつでも制約の違反が現れるまで逐次続ける。ここに、4つの系統特性とは、潮流熱容量、電圧安定性、定態安定性、過渡安定性。

このように、4通りの系統特性により制約される安全運用の限界のうち、最も厳しい限界まで増加できる総需給量が、その想定事故に対する系統余力として定義される。

〈4・2〉 系統余力に関する留意事項 系統余力の考え方に関して、留意すべき点を以下に4項目挙げておく。

(1) 系統余力は、流通部門が全系として一律に持つ余裕の量を表す値である。この数値はそれぞれの地点ごとに与えられるが、本来はその地点の設備の事故に対して定められる数値である。また、その設備自体が持つゆとりの値を意味するものではないことにも注意を要する。

(2) 系統余力の大きさ（安全運用の限界）を支配する設備などの要因（ボトルネック）は、必ずしも想定事故の地点の設備だけとは限らない。また、一般に要因の数が単数であるとは限らない。実際のところ、想定事故に対する系統余力とボトルネックとの因果関係を解明する理論（感度解析など）は未だ完全に確立されていない。

(3) 需給増加ルールは目的に応じて各種がある⁽⁷⁾。ルールの取り方により、系統余力の意味や数値も全くと異なってくる。本稿で採用した需給増加ルールは、供給側については可能増設量に、需要側については予測増分量に、それぞれ比例させながら、需給量を逐次増加していくルールとしている。この理由は、ここでの狙いが将来の流通部門に予測される需給の増大が一律として、その誤差に対し耐え得る程度を把握することにあるからである。

(4) 4通りの系統特性による安全運用の保障チェックは2つの範疇に分けられる。前者3つは静的（アデカシイ）チェック、後者1つは動的（セキュリティ）チェックと呼ばれる。一般に採用される単一事故として、前者3つには設備解列が、後者には3相短絡がそれぞれ仮定される。

〈4・3〉 持続曲線における系統余力の大小 ある特定の（または複数の）運用状態において、流通部門のすべての想定事故（地点）を対象に算定した系統余力を大きさ順に並べると、ひとつの持続曲線ができる。電力系統の計画案の条件を満たすには、この曲線は当然プラス側に存在しなければならない。ほかにも、系統余力の大小の値から計画案について以下のような評価に用いることができる。

まず、系統余力が小さい部分について調べてみる。

(1) ある地点の年間における系統余力は、重潮流の時点ほど小さくなる傾向がある。このことから、年ピーク時における持続曲線の系統余力の最小値は実質的に流通部門のいわば供給予備力に相当する。また、最小値を取る地点は、その計画案の最大の弱点箇所であることを示している。

(2) 今後は電力自由化などに伴い、従来の計画基準では想定されない需要急増などの異常事態が多発していく可能性がある。これら新規の不確実性に対処するため、適正に設定すべき最小値レベルの見直しが必要になる。

一方、系統余力が過大な部分からは、持続曲線の形状に対して以下のような評価の仕方ができる。

(1) 過大な系統余力の地点の設備は、部分的に取外されたとしても（全部は取外さない）、全体としての必要最小限の供給能力は確保されるため、計画案が満たすべき基準には何ら抵触せず、その評価にも影響しない。したがって、このような地点の設備容量は過剰である可能性がある。

(2) しかし、前述のように系統余力の大きさは潮流状態に左右される。年間の特定の時点だけで計画案における設備の過剰性を評価してはならない。一般に軽潮流の時は系統余力が大きくなる傾向があるため、過剰性の分析に当たっては年間ピーク時だけ対象とせず、その地点が最も重潮流となる時点を含めて系統余力を算定すべきである。

〈4・4〉望ましい持続曲線の形状 前項の記述をさらに一般化することにより、系統余力の持続曲線の形状が、電力系統の計画案（構成案や運用案）の選定に役立つことが示される。このため以下に、系統余力の分布を特徴づける持続曲線の形状パラメータについて考えてみる。

(1) 系統余力の分布が適度な凹凸を持つことは、むしろ高成長時代のインフラ形成に有利であった。一時的に冗長な設備でもいずれ有効に使用される時機が訪れたからであり、設備投資の平滑な年度展開にも寄与した。しかし、今後は成長低下に合わせつつ、不確実性への対応と設備投資の抑制（安全性と稼働性）が強く望まれるようになる。

(2) そこで、今後の流通部門が持つべき要件は、全体の系統余力をあるレベル以上に保つことと、過大な部分を可能な限り残さないこと、の2点にまとめることができる。このため、これらに対応して持続曲線の形状を特徴づける2つの主要なパラメータを導入する。ひとつは系統余力の分布の最小値である。もうひとつは系統余力の散らばりに対する変動係数（標準偏差/平均値）である。

(3) 電力系統の計画案を評価する場合の指標として、ここに前者を余裕度（Reserve）、後者を偏差度（Deviation）と呼ぶことにする。計画案の選定に際して、前者は全体に亘り適度な供給能力のゆとりが維持されることを評価する指標で、一定の値より大きいことが望ましい。後者は全体に亘り極端に過剰なゆとりの部分が存在しないことを評価する指標で、できる限り小さい値であることが望ましい。

(4) ここで付記事項として、極めて非現実的ではあるが、完全に均整のとれた電力系統の条件、すなわち上記の2つの指標とも常にゼロの場合について触れておく。言い換えれば、年間に亘ってどの地点に単一事故が発生しても、必ず安全運用の領域の境界に到達するような電力系統である。こうした特性を持つ電力系統の例は、いくつかの仮定を設けることによって構成できることが確かめられる。

5. 系統余力による拡充論理とモデル系統への適用

本章では、電源増設の拡充論理の一例を示し、例題として図1のような簡単なモデル系統に適用してみる⁽⁹⁾。これらを通して、本稿が提案する系統余力による考え方の有効性について検証する。

〈5・1〉前提事項 まず、21世紀のわが国に予測される主要な変化傾向に基づき、以下の事項を前提にする。

(1) 所要の増設電源の種類は、大規模集中電源と小規模分散電源の2種類とする。量的な面において、前者が主体になるものとし、後者は前者を補完するものとして扱う。

(2) 増設地点については、大規模電源の場合は立地の

困難性を考慮し新規地区は候補とせず、基幹系統における既設地区（電源基地）から選定する。個々の増設地点はリブレースなどにより十分な増量の余地があるものとする。

(3) 一方、小規模電源の場合は、オンサイト電源として需要地区に設置する。また、すべて非同期型電源として扱う。需要地区においても設置の余地は十分であるとする。

(4) 流通部門についても、基幹系統の新設は厳しく、既に先行的に整備されているものとする。つまり、初期状態と最終状態は同じ構成で、設備も既設のままとする。

(5) 以上の供給面からの制約のもとに、総需要量は次第に飽和していくものとして考える。飽和点に達するまで個々の需要地区の増加分を満たすよう、最も効果的な地点に増設電源を逐次拡充していくことを目的とする。

〈5・2〉拡充論理の一例 以下に、系統余力による増設電源の拡充論理の例を示す。ただし、この例は提案する考え方の基本を示すために便宜的に簡略化したもので、必ずしも数理的に厳密な最適性を保証する論理ではない。

(1) 拡充過程の全体は図2のように、状態（計画案）と分岐（選択肢）から構成される多段の樹枝状チャートになる。出発点に初期状態の電力系統を設定する。この拡充論理では、その段階の状態（計画案）から見て、最も効果的な増設地点を1ヶ所選んで、所与の容量を1基増強する。これを次の段階の計画案にして決定（便宜的に固定）する。

(2) 以上の手順を総需要量が満たされる最終状態まで、逐次繰返していく。なお、それぞれの段階において、増設の効果を算定し分岐（選択肢）を作成する際には、余裕度と偏差度の指標を用いて評価する。ここでの論理では、前者を主の指標として評価し、もし同一評価の場合は後者を副の指標として判定することとする。

〈5・3〉モデル系統と算定条件 上述の前提事項と拡充論理に従い、電源増設の過程の例を示す。図1は初期状態のモデル系統である。需給時点は1つだけを対象にしている。算定条件は、以下のように設定している。

(1) ベース容量は1.0[GVA]。初期状態の総需要は12.0。電源地区はG1, G2, G3で、それぞれの発電出力は6.0, 2.0, 2.0。G0は無限大母線で2.0を連系受電している。需要地区はD1, D2, D3で、負荷はそれぞれ1.4, 6.0, 4.6。ただし、電圧と無効電力の表示は省略してある。

(2) 今後の総需要は1.5倍に飽和し、その増加量は6.0。これをD1, D2, D3の3地区が30%, 40%, 30%の割合で配分する。また、電源の増設順序については、総需要の増加分を初めは大規模集中電源が、次いで小規模分散電源が賄うものとして、単純化して扱うものとする。

(3) 電源増設の候補地点は、大規模集中電源の場合は電源基地のG1, G2, G3の3ヶ所。小規模分散電源の場合は需要地区D1, D2, D3の3ヶ所。増設の容量は単純化のためにすべて一律とし、大規模集中電源の場合は0.5, 小規模分散電源の場合は0.1。基数はそれぞれ11基と5基。また、すべての候補地点に増量の上限は設けないものとする。

(4) 流通部門は 500 kV の基幹系統。系統の形態は初期状態から最終状態まで変えない。5 つの送電線 T1, T2, T3, T4, T5 はすべて 2 回線で、潮流の熱容量は 5.0×2 。想定事故の地点は 5 つの送電線とし、それぞれ 1 回線の開放および送電端での 3 相短絡（再閉路を考慮）を設定。

(5) 需給増加ルールについては、個々の段階で増加される需給量を、発電側と需要側がそれぞれの大きさに比例し逐次分担していく。増量の刻み巾は、大規模集中の場合 0.5。ただし、計画案の比較に詳細計算が必要な場合は 0.1 とする。また、小規模分散の場合は 0.1 とする。

〈5・4〉適用結果と考察 ここでは、図 1 に示すモデル系統に対して上記の論理と条件を適用し、増設電源の選定過程、系統余力の持続曲線の変化、2 つの評価の指標の推移や相関などについて考察を加える。

(1) 図 2 は、それぞれの段階での増設電源の選定過程を示したもの。初期状態から最終状態に至る経路から、初めの大規模電源の段階で G3, G3, G3, G2, G2, G3, G2, G2, G3, G1, G2 の 11 ヶ所が、後の小規模電源の段階で D1, D3, D1, D3, D3 の 5 ヶ所が選定されていることを

示す。枠内の数字は主の指標（余裕度）を表し、それぞれの段階で最も大きな数値の地点が選定される。+ のマークは副の指標（偏差度）が選定に参考にされた場合を意味している。

(2) 図 3 に、拡充過程における計画案の 2 つの指標の推移の様子を示す。まず、余裕度（実線、左軸）の動きをみる。初めの大規模電源の段階では、増設の量が 1.0-2.0 で余裕度は大きくなっており、発送電の整合が良好な範囲であることを示す。この上昇の理由は G3 地区における増設により、最小の系統余力を取る送電線（T2、図 4 参照）の潮流が抑制されたためである。その後の余裕度の継続的な低下は、大規模電源による限り改善には限界があることを示唆する。しかし、小規模電源の段階で再び上昇している。需要地近傍への電源導入が余裕度の改善に効果を発揮することは当然であるが、さらに同期型電源もここに加わるならば、一層高い効果が期待されると考えられる。

もう一方の指標である偏差度（破線、右軸）を眺めてみると、まず余裕度とは互いに逆の動きが観察され、両者の推移にはある程度の相関が認められる。これは系統余力の

図 1 初期状態の電力系統

Fig. 1. Power system at the initial stage.

図 3 系統余力の指標の変化

Fig. 3. Change of system margin indices.

図 2 拡充電源の選定過程

Fig. 2. Expansion process of generation unit.

小さい地点を流れる潮流の一部が、ゆとりを持つ他の地点に移ることによるものである。したがって、主の指標である余裕度を大きくするように地点選定を行えば、自ずと副の指標である偏差度は小さくなることが推測される。

なお、全体的な結果として、総需要量が1.5倍に増加したにも関わらず、結果として2つの指標とも初期状態と最終状態において大きくは変わっていないことも分かる。

(3) 図4は初期状態と最終状態における系統余力の持続曲線を比較したもの。これより、系統余力の最小値はほぼ維持されるが、最小値を取る地点はT2(過渡安定性による)からT4(潮流熱容量による)へと移行している。一方、系統余力の大きい部分については全体的に降下した傾向が見られる。最大値については、地点はT5で変わらず、また著しい低下は実現されていない。ただし、この過剰性に関しては前述のように、他の潮流条件も対象にして評価すべきである。また、系統余力の大きい部分については、最小値を引き上げるように地点選定を行えば、自然と下がってくるものとして対処してよいと考えられる。

(4) 図5は、最終状態の電力系統を示したもの。図1と比較して潮流状態も一部を除き極端に変わってはいないが、上記の分析から電源と流通との整合性がより向上された状態であると判断される。以上のように、本稿のモデル

系統と拡充論理の事例に関する限り、需要の大幅な増加に対しても、既設の流通設備のまま、その有効活用によって所要の電源増設が実現できることが示された。つまり、電力系統における供給能力のゆとりの均一化に注目すれば、供給の安定と投資の抑制が同時に図れるとの可能性が示唆された。また、供給能力を調和させる手法として、提案の系統余力による指標が役立つことが検証された。

6. おわりに

本稿で述べた主要な事項は、以下の2点に集約される。

(1) 電力自由化などに伴う不確実性の増大と大規模インフラの新規形成に対する困難さを前提にして、21世紀のわが国が究極的に目指すべき電力系統の理想像を描き、対応すべき課題に取り組むことの必要性を指摘した。

(2) 理想的な電力系統の技術的要件は、コストとリスクの両立を狙って電源と流通の供給能力を協調させることであり、その具体的な実現のために系統余力の考え方を既設設備の活用方策に採用すべきことを提案した。

〈6・1〉 今後の検討課題 今後の研究の展開に残された検討テーマの例として、次の7つを挙げておく。

(1) 21世紀に目指すべき電力系統の最適形態について、その技術面の要因や条件を広く体系づける研究が望まれる。本稿では電源と流通と均衡性から見た視点だけを挙げたが、ほかにも短絡容量の制約など各種の技術問題を含めて考えてみる必要がある。

(2) 系統余力の算定に対する一層の高速化、特に過渡安定性を迅速に判定できる実用的ツールの開発が必要である。そのため、エネルギー関数やスペクトル分析による解析手法のほか、スクリーニング機能の研究なども期待される。

(3) 電力系統の構成要素の動きは有機的に関連し合っているため、系統余力が不足した場合、そのボトルネックの支配要因を特定したり解消する方法が未だ十分でない。特に、過渡安定性に関する理論的基盤が明確にされていない。

(4) 系統余力の算定における想定事故ルールとして、画一的な基準を採ることは合理的でない。(n-1)ルールに簡便な重みづけを加味したり、(n-2)ルールを一部に組み入れるなど、実用性を失わない範囲での工夫が望まれる。

(5) 本稿での系統余力の持続曲線は、巾が一定の棒グラフによって確定論的に構成されているが、個々の巾を事故頻度に対応させて表す確率論的な方法もある⁽⁷⁾。系統余力の適正レベルの選定やコスト/リスクのトレードオフの分析などには、確率論的な考え方が必要になってくる。

(6) 系統運用のオンライン情報に従来の電力潮流に加え、系統余力の分布状況も採り入れ、弱点監視などに役立てていく。オープンアクセスのための情報提供やゆとりの維持に必要な費用分担の議論も避けて通れない。

(7) 今後の電力自由化の進展過程では、流通部門の全体から見て好ましい地点に増設電源を誘導することが望まれる。この際、参入者への合理的なインセンティブ(奨励策)について、発送電の均衡性の観点から検討してみる。

図4 系統余力の持続曲線

Fig. 4. Duration curve of system margin.

図5 最終状態の電力系統

Fig. 5. Power system at the final stage.

〈6・2〉 社会と工学との繋がり 冒頭に示した電力システムを巡る3つの動向に関連して、社会と工学との連携の視点から、所感として次の3点を補足しておきたい。

(1) 電力システムの将来像の創造 21世紀の電力システムの大きな動向として「集中から分散へ」の流れがある。当所では先に電力システムのあり方のひとつとして2層システム構造のコンセプトを掲げ、将来は大別して基幹系統と需要地系統とに方向づけられていくとの見方を示した⁽¹⁾。そこでも本稿と同じように、当面は基幹系統(電源基地)が電力供給の主役を続けるとの見方に立っている。一方、需要地系統については、小規模分散電源の導入に関する限り、環境やコストのほか系統連系など各種の面から限界があると考えられる。むしろ、需要地系統の存在意義は、基幹系統の支援を基盤として、電気エネルギー依存型社会(量・質とも)を直接支える公益的ライフラインの役割を強めていくことにある⁽⁴⁾。さらに長期的には、電気文明時代を担うコミュニティ型のエネルギー・情報センターとして、地域に密着した総合的なサービスを提供していくことにある。

(2) 電力自由化への工学的取り組み 本稿では、日本の電力システムの将来像に望まれる条件のひとつは、電源と流通との均衡性であることを述べた。しかし、もし多数の参入者がそれぞれ無秩序な自由のもとに競争し合うならば、全体としての何らかの不調和が生じ、国民経済的に実現は難しくなる可能性は大きい。そもそも、複数の供給者が個々に利己的活動(最大利潤の追求)に努めると同時に、すべての消費者の幸福や社会のニーズ(ユニバーサルな福祉)にも応えつつ、さらに全体の最適性も満たし得るような巧妙な仕組み(制度設計)は存在するのだろうか。電力システムの技術者にとって、社会や経済の分野の基本理論を学びながら、工学の面からこの難問に挑戦することは確かに意義のあることではあるが、技術者としての立場から軸足の置き場所を絶えず確認しておくことが必要である。

(3) 電力供給に関する技術情報 これまで電力供給に携わる技術者は、社会の人々と緊密な関係を持ってきたとは言えない。電気自体が眼に見えないこと、電力供給の技術がかなり特異なことから、一般の人々に対する説明が困難な点はあるが、社会の理解を得るための技術者の努力も決して十分ではなかった。今後、電力自由化や新サービスを通じて、消費者と供給者の距離が次第に縮まっていくと、専門の技術者から正確でかつ平易な基礎知識の解説を直接広く提供していくことが大切になる。これは誤解や不信を招くことのない世論の形成にも繋がっていく。また、社会の合意、企業の責任、費用の分担に関わる事柄になると、情報に透明性や公開性が求められる。説明には公平性のほか、アクセスには利便性も重要になる。このように社会へのアカウントビリティにとって必要なニーズに応えるため、電力システム工学においても、社会との接触に向けた新しい学問領域を構築することが望まれる⁽³⁾。また、人々とのこうした直結の機会を通じて、技術者が自身の持つ主張を積極的に発信していくことも必要である。

謝 辞

本稿の研究をまとめるに際して、(財)電力中央研究所電力システム部長栗原郁夫氏ならびに同需要家システム部長田中和幸氏からは議論を通じて貴重な意見を頂いた。また、(株)アクセンチュア林建悟氏からはデータ作成に関して多大な協力を受けた。ここに各氏に対して深甚なる謝意を表したい。

(平成14年11月13日受付)

文 献

- (1) "Electric Power Systems and Related Technologies in the Mid-21st Century", CRIEPI Research Document, T98913 (1999) (in Japanese)
「21世紀中葉の電力システムと技術課題」, 電中研研究調査資料, T98913 (1999)
- (2) K. Takahashi and I. Kurihara: "A Next Century Perspective on the Growth of Electric Power System of Japan", CIGRE 99 Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia (1999)
- (3) "A Vision of Electric Power Supply and Technological Requirements in the 21st Century", CRIEPI Committee Report, T00801 (2000) (in Japanese)
「21世紀電力ビジョンと技術課題」, 電中研委員会報告, T00801, (2000)
- (4) K. Takahashi and T. Ohyama: "A View of Power and Energy Issues and Technological Fundamentals in the 21st Century", *J. IEE Japan*, Vol.121, No.1, pp.36-40 (2001-1) (in Japanese)
高橋一弘・大山:「21世紀の電力・エネルギー展望と基盤技術」, 電学誌, 121, 1, pp.36-40 (2001-1)
- (5) K. Takahashi and I. Kurihara: "A New Concept on Adequacy Evaluation in Power System Planning", *PSCC*, Avignon, France (1993)
- (6) I. Kurihara, K. Takahashi, and B. Kermanshahi: "A New Method for Evaluating System Margin under Various System Constraints", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.10, No.4, pp.1904-1911 (1995)
- (7) K. Takahashi, I. Kurihara, K. Tanaka, and A. Inoue: "A New Evaluation Method on Load Transfer Capability of Trunk Power Networks", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.11, pp.1430-1435 (1997-11) (in Japanese)
高橋一弘・栗原・田中・井上:「基幹系統の電力輸送力に関する新しい評価方法」, 電学論B, 117, 11, pp.1430-1435 (1997-11)
- (8) B.J. Lee, K.Y. Song, Y.S. Kim, I.S. Kim, I. Kurihara, and K. Takahashi: "Indices for Studying Long-term Transmission Network Expansion Plan", *ICEE 99*, E405, Hong-Kong (1999)
- (9) K. Hayashi, K. Takahashi, and E. Hotta: "Evaluation of Capacity Balance between Generation and Transmission of Power Systems", 2001 National Convention Record, IEE Japan, No.6-049 (2001) (in Japanese)
林・高橋一弘・堀田:「電力システムにおける電源と流通の均衡性評価」, 平成13年電気学会全国大会, No.6-049 (2001)

高橋一弘 (正員) 1939年4月8日生まれ。1964年東京大学電気工学科卒業。同年電力中央研究所入所。主に電力系統の研究に従事。1985年システム部長, 1997年理事。1995年~東京工業大学客員教授を兼務。1994年電気学会業績賞, 1996年科学技術庁長官賞を受賞。1997年電気学会副会長。著書「電力システム工学」など。工学博士。IEEE Fellow, CIGRE 会員。