需要端予備率に基づく発電・送電システムの信頼度評価

正員 持 舘 靖 典 (東北電力)

正員 斎 藤 浩 海 (東 北 大)

正員 豊 田 淳 一 (東 北 大)

Composite Power Systems Reliability Evaluation based on Demand-Side Reserve

Yasunori Mottate, Member (Touhoku Electric Power Co., Inc.), Hiroumi Saitoh, Member,
Junichi Toyoda, Member (Touhoku University)

This paper proposes new demand-side reliability indices and useful computational techniques for reliability evaluation of composite power systems. These new indices are based on the active power which can reach at each demand spot under generating and transmission network constraints. This conception is defined as “reachable power”, and it leads the reserve margin on each demand spot, which is called as “demand-side reserve”. If the reachable power is insufficient to satisfy the demand, load curtailment is required. In the proposed approach, the conception of load curtailment area is defined, and the estimate method of load curtailment area is indicated. In case the reachable power exceed the demand, system reliability is evaluated by the demand-side reserve, and the power system is divided into several reliability zones according to the demand-side reserve levels. Small system examples are used to illustrate principles of the proposed approach, and middle system examples show the effectiveness and practicalness.

キーワード：信頼度評価，需要端予備率，供給支障地域，信頼度ゾーン分割，線形計画法

1. ま え が き

我が国では、需要の増大とともに大都市への需要の集中傾向が強まり、また電源の遠隔化・偏在化による送電設備の長距離化・大容量化が進んでいる。更に今後、広域連系が推進される気運があり、十分な供給力の確保と同時に、余裕のある流通設備の確保も不可欠となると考えられる。一方、社会生活の高度情報化により、停電の与える社会的影響は極めて大きなものとなっており、発電設備と送電設備を含めた供給信頼度の評価の重要性が、ますます増加している。

本論文では、需要端における評価に焦点を当てた信頼度指標の提案と、その評価を行う発電・送電システム信頼度算定の手法について述べたい。評価の基となる指標として、発電機出力制約および送電ネットワーク制約の下で各需要端に供給可能な電力(到達可能電力)

と、供給支障が生じるまでの余裕(需要端予備率)という新しい概念を導入している。また、需要端予備率の度合いに応じた信頼度による地域分割の手法を開発している。

一般に、送電システムを含む静的な信頼度評価の有力な手段の一つとしては、潮流計算による想定事故解析が挙げられる。しかし、通常の潮流計算では発電機出力を固定的に扱い、送電線の過負荷情報を得ることができず、最終的にそれが回避可能かどうかを判定することはできない。従って、需要端への電力供給能力を評価するには適さず、需要端側での信頼度評価というよりも送電システムの輸送能力の評価法といえる。

我が国では、長期電力需給計画の策定のための日本電力調査委員会による供給予備力の算定法⁽¹⁾が確立しているが、需要端信頼度の評価にまでは至っていないと考えられる。

また、確率論的手法に基づく扱う発電・送電系統信頼度の評価法としては需要端における供給支障量の算定があり、特に海外において、供給不能電力量期待値(EENS)を算定する手法が広く用いられている^{(2)~(4)}。しかし、この手法では供給支障が生じない場合には何の情報も得られず、また供給支障母線は負荷制限の方針により変わり、明確な供給支障地域概念は存在していない。

本提案手法による評価は、まず最初に系統全体の供給支障の発生の有無を判定し、発生する場合には供給支障量と供給支障地域、発生しない場合についても供給支障が生じるまでの余裕(需要端子備率)とその度合いの地域分布を求めるというものである。すなわち、提案手法では系統全体の供給信頼度を評価することのほかに、個々の需要とネットワークから決まる地域的な信頼度分布、地域的な信頼度の違いの原因となる送電線を明らかにすることができる。

本提案手法は、著者らにより、通常の輸送問題とのアナロジーからネットワークモデルを構成した手法^{(5)~(7)}を発展させたものであり、電力回路の性質(位相角制約)を組み込むことにより、より現実的な信頼度評価が可能となった。また、上げ方向予備力、下げ方向予備力などの概念を導入している。

2. 提案する需要端信頼度評価の指標と概要

提案する信頼度評価法の基本的な考えは、「需要端における信頼度を、電力の輸送システムを経由して電源から需要端へ到達可能な電力で評価する」というものである。

この各負荷に到達可能な電力を“到達可能電力”と定義する。発電機出力制約と送電ネットワーク制約により到達可能電力の上下限が定まり、図1に示すように需要電力がその上限を超えれば供給支障、下限を下回れば供給過剰が生じることになる。

本論文では、到達可能電力の上限と需要電力の差を“上げ方向需要端子備力”、下限と需要電力との差を“下げ方向需要端子備力”と定義している。重潮流による送電容量制約が問題となるのは主に上げ方向であり、本論文では特にことわらない限り、上げ方向の問題を中心に取り上げている。下げ方向が問題となるのは、夜間などオフピーク時に原子力発電所など最小出力の大きな電源が偏在化したり、線路補修などにより十分な流通経路が確保できなくなったりしたとき、地域的な供給過剰を監視する重要な評価因子となる。

提案する需要端信頼度の評価アルゴリズムを図2に示した。まず各需要端に到達可能な電力が、それぞれ

図 1 到達可能電力の概念

Fig. 1. Concept of the reachable power.

図 2 提案する需要端信頼度の評価アルゴリズム

Fig. 2. Proposed algorithm for demand-side reliability evaluation.

の需要を上回ることができるか検討し、流通経路の十分性を確認する。これが最小供給支障電力の算定であり、その結果により系統全体の供給支障の有無を判定する。供給支障が発生する場合には、供給支障地域と供給支障の原因となる弱い線路の同定を行う。ここで供給支障地域とは、到達可能電力の上限を超えた需要端である。供給支障の生じない場合には、各需要端への到達可能な電力を全系統で均等化するように分配して、均等需要端子備率で系統全体の信頼度を評価する。合わせて到達可能な電力の余力の大小により系統を信頼度ゾーンに分割する。

3. 需要端信頼度の評価手法

〈3・1〉 ネットワークモデル 潮流分布を厳密に扱う場合には非線形問題として記述する必要がある

図 3 各ノードにおける電力潮流の関係
Fig. 3. Relationship among the power flow on each node.

が、本論文では、有効電力フローの問題、需要端評価の問題に焦点をあてるため、潮流分布の決定には直流法による線形モデルを用いて簡略にしている。

図3に示すように、 $\#i$ ノードの発電機出力を P_{Gi} 、ネットワークへの送出電力を P_{Fi} 、 $\#i$ 需要端への到達可能電力を P_{Di} とすれば、

$$P_{Gi} - P_{Di} = P_{Fi}$$

$$\begin{pmatrix} P_{F1} \\ \vdots \\ P_{Fn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{node} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \end{pmatrix}$$

あるいは、

$$P_G - P_D = P_F \quad (1)$$

$$P_F = B_{node} \cdot \delta \quad (2)$$

が成立する。ここで、 B_{node} は直流法によるネットワークのノードサセプタンス行列、 δ は電圧位相角ベクトルである。本論文でとりあげる手法では、各線路の潮流 P_f の上下限制約を判定する必要があり、ネットワークの接続行列 C を用いると、

$$P_F = C \cdot P_f \quad (3)$$

$$P_f = B_{line} \cdot C^t \cdot \delta \quad (4)$$

が成立する。ここで、 B_{line} は各線路のサセプタンスを対角要素とする対角行列である。

(3.2) LP による需要端信頼度指標の算定

提案手法の基本となる計算は、(i) 供給支障電力の算定、および (ii) 均等需要端予備率の算定の二つであり、線形計画(LP)問題として定式化する。

(1) 供給支障電力の算定 評価の第一段階では、各需要端の需要に等しいだけの発電力を、流通経路を経由して分配可能であるかを評価する。(8)式の制約の下で、(5)式は系統全体の供給支障を最小化する

ることになるので、 z が 0 であれば供給支障はないことになる。 z が 0 以外(必ず正)の数値になれば、それは最小供給支障量を表し、同時に供給支障電力を最小にする発電機出力パターン、供給支障の生じる需要端などが決まることになる。

$$\min z = \sum_i (d_i - P_{Di}) \quad (5)$$

subj. to (1), (2), (4) 式の各等式制約

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \quad (6)$$

$$P_{fmin} \leq P_f \leq P_{fmax} \quad (7)$$

$$P_D \leq d \quad (8)$$

ここで、添字の min, max : 下限制約と上限制約、 d : 需要 d_i のベクトル

(2) 均等需要端予備率の評価 供給支障がない場合、需要端における到達可能電力の組合せは無限にある。しかし、電力系統に信頼度に関して地域的公平性が望まれる場合には、すべての需要端での予備率を同等に保った状態で系統全体の信頼度を評価するとよい。この考え方を実現するためには、各需要端での到達可能電力の需要端予備率を均等化することにあると考えられるので、次の定式化が可能である。

(11)式の左辺は、各需要端の予備率を表しており、(9)式と組み合わせると各需要端の予備率を均等化して更に最大化を図っている。(10)、(8)式では大小関係が逆転していることに注意されたい。

$$\max x_r \quad (9)$$

subj. to (1), (2), (4), (6), (7) の各式

$$P_D \geq d \quad (10)$$

$$\frac{P_{Di} - d_i}{d_i} = x_r \quad (11)$$

〈3.3〉 信頼度の大小による地域分割 電力系統の状態は、供給支障が発生する場合と、発生しない場合の二つに分けられる。供給支障が発生する場合には、供給支障が発生する可能性のある母線の群(供給支障地域)を求め、発生しない場合には需要端予備率の度合いに応じた信頼度の地域的分割を行う。

(1) 供給支障が起こる場合 系統全体として供給力が十分であってもネットワーク制約により供給支障が発生する場合には、その原因となる線路(群)が存在し、系統はその線路(群)を境として、図4のように需要を上回る電力を供給できる地域と、そうでない地域(供給支障地域)に2分されることになる。逆の立場でいうと、供給支障地域内で需要を減少させれば線路の過負荷を回避できることを意味している。

いま、図4の#3の線路の潮流が送電容量制約により制限されると、これと回路的に並列している#1、

#2の線路の潮流もそれ自身の送電容量以下ではあるが、潮流制約を受けることになる。現実のネットワークでは送電容量により制限された線路と並列する線路の組合せは複数あるので、図4のように健全地域と供給支障地域を分離する線路の組合せの選定法が必要となる。

供給支障電力の算定法を利用した供給支障地域判定のアルゴリズムは次のようになる。

(i) 供給支障電力が最小になる各需要端への到達可能電力の分布を決定する。

(ii) 供給支障と判定された需要端への到達可能電力を、その母線の需要と等しく固定して、再び供給支障電力最小の問題を解き、各需要端への到達可能電力を求める。

(iii) (ii)の操作を反復する。ここで、LPの実行可能解が存在しないとき、すなわち各需要端への到達可能電力が求まらないとき、供給支障地域の判定は終了となり、供給支障地域は、それまでに供給支障が生じると判定された需要地点すべてとなる。言い換えれば、本論文でいう供給支障地域とは、その地域内のすべての需要に対して負荷制限をしなければ、LPの実行可能解が求まらないという地域を意味している。

(2) 供給支障が起こらない場合 需要端予備率の度合いによる地域的分割(信頼度ゾーン分割)は、次のように均等需要端予備率の評価法を利用して行う。

(i) 均等需要端予備率の算定を行う。

(ii) 系統を均等需要端予備率以上の需要端予備率をとれる余裕のある地域と、ぎりぎりの余裕のない地域で2分割する。具体的には、均等需要端予備率のときの到達可能電力分布を微小増加させた需要を想定し、供給支障地域を求めるアルゴリズムを利用して、ぎりぎりの余裕のない地域を決める。

(iii) 均等需要端予備率までしか需要端予備率をと

図4 供給支障地域の概念

Fig. 4. Concept of the load curtailment area.

れない地域はそのときの到達可能電力分布で固定して、更に余裕のある地域について、信頼度ゾーン分割を考える。

(iv) 以上の(i), (ii), (iii)の操作を反復する。

(i)の結果、到達可能電力の総和が総発電能力に等しくなれば、信頼度ゾーン分割は終了となる。

4. モデル系統における検討例

4・1 小規模系統の場合

(1) 供給支障が発生する場合 図5に示す3機4母線、負荷需要数4、線路数4の小規模系統に提案手法を適用した結果について説明する。この系統では供給支障が発生し、需要#3, 4が供給支障地域と判定される。供給支障の原因となる線路は、潮流が送電容量で制限される線路(#1-#4)と、それとループを組む線路(#2-#3)である。この判定の流れを以下に示す。

(i) 供給支障電力最小の問題を解いた結果、線路(#1-#4)の潮流が送電容量により制限されるため、需要#4に12.5 MWの供給支障が発生する。

(ii) 次に、需要#4で負荷制限しないケースについて再び供給支障電力の算定を行うと、需要#3で供給支障が発生する。ただし、その場合の供給支障量は16.7 MWとなり、需要#4で負荷制限する場合よりも供給支障量が増大する結果となる。

(iii) 次に、需要#3と#4で負荷制限を行わない場合について再び供給支障電力の算定を行うと、LPの実行可能解が存在しない。これは、負荷需要#3と#4

□ : 発電機容量(MW) ◻ : 負荷需要(MW)
○ : 送電容量(MW) 在

各線路のリアクタンス(puΩ): $x_{12}=0.1$, $x_{14}=0.4$, $x_{23}=0.2$, $x_{34}=0.1$, 各ノードの電圧は1 puに設定

図5 小規模系統例とその供給支障地域

Fig. 5. A small system example and the load curtailment area.

図 6 小規模系統例とその信頼度ゾーン分割
Fig. 6. A small system example and the reliability zones.

に同時に需要電力が到達することは、ネットワーク制約上ありえないことを表している。従って、供給支障地域は需要#3と#4の2つの母線となる。

(2) 供給支障が起こらない場合 図5の系統の母線#2, 4間に線路を加えた場合である図6の系統に提案手法を適用すると、この系統では供給支障が解消されることがわかる。また、この系統のネットワークを無視した系統予備率は20%であるが、均等需要端予備率の算定を行った結果は線路(#1-#4)の潮流が送電容量により制限されるため、均等需要端予備率は8.5%となる。次に、需要端予備率による系統の分割を行うと、均等需要端予備率の8.5%以上の需要端予備率をとれる地域は需要#1のみとなり、系統は信頼度の違いにより2分されることになる。

ここで、需要#1の需要端予備率はネットワークを無視した系統予備率より大きくなっている。これは、ネットワーク制約のために他の需要(#2, #3, #4)に供給できなくなった発電機#1の出力を、すべて需要

図 7 中規模系統例とその信頼度ゾーン分割
Fig. 7. A middle system example and the reliability zones.

図 8 中規模系統例とその供給支障地域
Fig. 8. A middle system example and the load curtailment area.

#1に割り振ったために見掛け上生じるものである。需要端予備率が系統予備率より大きくなる地域は、ネットワーク制約が問題とならない地域であり、その需要端予備率の差は信頼度のかたよりを表している。

〈4・2〉 中規模系統の場合 図7に示す10機23母線の中規模系統に提案手法を適用した結果について説明する。この系統では供給支障は発生せず、均等需要端予備率は5.7%と算定される。この値はネットワークを無視した系統予備率の19.5%に対し、かなり低い値となっており、本論文のアルゴリズムによれば、その原因となる線路は図中の太線の線路と判定される。また、需要端予備率の度合による信頼度の地域的分割を行うと、系統は需要端予備率5.7, 7.9, 48.5%の三つの信頼度ゾーンに分割され、系統の大部分が5.7%と低い需要端予備率になることがわかる。

図7の線路(#15-#21)にルート事故が生じた場合を想定した図8の系統では、供給支障が起こると判定され、最小供給支障電力は母線#15の需要端で14.9MWが供給不能となることがわかる。また、供給支障地域の判定を行うと、図のように系統の大部分で供給支障が生じることがわかり、全域的な評価ではわからなかった事故の影響の重大さを認識できる。

5. む す び

提案手法の特徴は以下のとおりである。

(1) 線形近似の式を用いており収束性の問題がなく、LPによる高速性が期待できる。逆にいえば、本手法の限界は非線形問題を線形化した点にある。

(2) 送電ネットワーク制約による供給支障の有無と需要端への電力供給能力に関する情報が得られる。

(3) 信頼度指標として到達可能電力と需要端予備率という単純な概念を用いるため、算定された結果が直観的に理解しやすいものとなる。

(4) 供給支障地域と需要端予備率の度合による信頼度ゾーン分割の概念を導入し、系統内の信頼度分布を表現することを可能としている。

提案手法は比較的単純で、次のような系統運用・計画の支援ツールとして広い応用が考えられる。

- (i) 通常の潮流計算と組み合わせた想定事故評価の支援
- (ii) 線路補修計画策定の支援
- (iii) 電源起動停止など需給運用計画支援
- (iv) 電源設備・送電設備の計画策定支援

なお、本研究の遂行にあたっては、東北電力(株)技術部の関係者、皆川部長をはじめ多くの方々の御意見

御討議をいただいている。深甚の謝意表する。

(平成4年11月26日受付, 同5年5月26日再受付)

文 献

- (1) 日本電力調査委員会: 日本電力調査報告書における電力需要想定および電力供給計画算定方式の解説(平4)
- (2) CIGRE WG 03 of SC 38: Power System Reliability Analysis. Application Guide (Lesley Kelley-Regnier. Ed) (1987)
- (3) CIGRE TASK FORCE 38-03-10: "Composite Power System Reliability Analysis Application to The New Brunswick Power Corporation System", CIGRE Reliability Symposium (1991)
- (4) R. Billinton & R. N. Allan: Reliability Assessment of Large Electric Power Systems (1988) Kluwer Academic Publishers
- (5) 諏訪・陳・豊田: 「ネットワーク制約を考慮した2 STEPLP法による信頼性の評価」, 電気学会電力技術研資, PE-90-128 (平2)
- (6) L. N. Chen, H. Suwa, J. Toyoda: "Power Arrival Evaluation of Bulk System Including Network Constraints Based on Linear Programming Approach", *IEEE Trans. Power System*, 6, 37 (1991)
- (7) J. Toyoda, L. N. Chen, T. Minakawa & T. Yamada: "New Indices and Computational Techniques for Composite Systems Reliability Evaluation", The paper of CIGRE Reliability Symposium, 1 A-01, p. 1 (1991)

持 舘 靖 典 (正員)

昭和42年8月11日生。平成3年3月東北大学工学部電気工学科卒業。同5年3月同大学大学院博士前期課程修了。現在、東北電力(株)勤務。

斎 藤 浩 海 (正員)

昭和35年7月19日生。平成元年3月東北大学大学院博士課程修了。同年4月同大学工学部助手, 4年4月同電気工学科助教授, 現在に至る。工学博士。

豊 田 淳 一 (正員)

昭和9年7月9日生。38年3月東京大学大学院博士課程修了。同年4月成蹊大学工学部電気工学科助教授, 47年4月同教授。58年4月東北大学工学部電気工学科教授, 現在に至る。工学博士。IEEE, CIGRE会員。