系統連系計画における信頼度計算について

釧路工業高等専門学校

村山 康 宏

1. ま え が き

電力系統計画には、電源計画、送電網計画、配電網計画、系統連系計画などがあり、これらを相互に関連づけて最適な拡張計画を立案しなければならない。近年電力需要がますます増加の一途をたどり、単にその量的な要求のみならず質的な要求もきびしさを増している現今では、信頼性についても需要家のみならず供給者側においても相当注意を払っている状態である。筆者は系統の信頼度の計算手法ならびに信頼度の観点からの最適な送電線の建設地点の決定方法について報告してきた。^{(1),(2)}

さて、電気事業の発生した初期においては、単に発電機から一般需要家に配電するという単純な形態であったが、次第に系統連系を拡大して、今日のような大電力系統に発展してきた。そこで今後系統連系も広範囲に実施されていくものと考えられるが、系統連系の効果の一つとして、信頼度の向上があげられる。この観点にたって系統計画を立案する場合、まず連系系統における信頼度を十分解析しなければならないことは明らかである。そこで筆者は連系系統のあらたな信頼度計算手法を提案し、供給予備力の位置の、信頼度に及ぼす影響について検討し、また連系線の採用方法の信頼度に及ぼす影響についてモデル系統で試算した。

2. 連系系統信頼度計算一般理論

〈2・1〉 概要 連系系統の信頼度を計算する場合、全体を単一の系統とみなしてグループフロー法⁽²⁾で計算できる。しかし直接この方法を適用することは計算

規模の増大などにより得策ではない。したがって、以下に述べる方法によって計算する。基本的な骨子は計算すべき負荷の属している単一系統以外の単一系統(複数個存在)から潮流余力を得られるものとする計算方法である。ここで信頼性と経済性との協調が問題になるが、本論では総建設費一定下における最高信頼度を与えるような系統連系計画について考察するものとする。

〈2・2〉 信頼度計算の手順 本論は総建設費一定下における系統連系計画である。その拘束条件として、

$$S \leq \sum C_{i,j} \leq \bar{S} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 S : 総建設費下限、 $\bar{S}$: 総建設費上限、 $C_{i,j}$: ノード i, j 間の線路建設費

また、

$$C_{i,j} = \lambda_{ij} \cdot m_{ij} \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 d_{ij} : ノード i, j 間の距離、 m_{ij} : ノード i, j 間の回線数、 x_{ij} : ノード i, j 間の1回線あたりの送電線容量、 λ_{ij} : 1回線1 MW 1km あたりの建設費

(1)なる条件下において、信頼度増分を最大にするような系統連系計画のための線路建設地点の決定問題としてとらえる。すなわち、

$$\sum_K \sum_i \delta r \rightarrow \text{最大} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 δr : 信頼度の増分 (メリット⁽¹⁾)、

i : ノード、 K : 各単一系統

さて、連系系統の信頼度計算を実行する場合に、まず、各単独系統の信頼度を計算する。⁽²⁾ 次に各単独系統の“ノードフロー”(後述)を計算する。そこで(1)式の拘束条件下において連系線を設定して全系のメリット⁽²⁾を計算する。そこで(1)式の条件下におさまればさらに連系線を設定して信頼度とメリットとを計算する。第1図はこのフローチャートである。

なお、この計算手順から得られる結果の解釈である

Reliability Calculation for Interconnected Power Systems. By Y. MURAYAMA, Member (Electric Engineering Course, Kushiro Technical College)

村山康宏: 正員, 釧路工業高等専門学校電気工学科

第 1 図 連系系統信頼度計算概略フローチャート

Fig. 1. Flow chart for calculation of reliability of interconnected power system networks.

が、系統連系を行なわない場合の信頼度と系統連系を行なった場合の信頼度とを、連系線の接続方法によっていかに変化するかについて述べるものであり、したがって、総建設費一定下における最高信頼度を与える連系線を決定できる点で意味がある。ここで本論で考察する連系系統は次のように分類される。

以下、上記の連系系統の信頼度計算方法について詳述する。

〈2・3〉木連系1点連系の場合 いま、各単独系統が第2図のような状態で連系されているものとする。No. 1, No. 2……は各単独系統を表わす。そこで単独系統相互間を最短木で連系するものとする。たとえば、No. 1 と No. 2 の連系線は最短路を採用する。(第3図)

最短木を採用した理由は、木はループを含まないからそれだけ計算が簡単になることと、建設費を可能な限り少なくすることから当然である。ここで今後の説明の便宜上“ノードフロー”の概念を記す。これは文献(1)で報告したが再記する。〔文献(1)ではノードフローという名称は使用しなかった。〕ここで

ΔG_α : ノード α に接続している電源のまだ使われずに残っている量

$\sum_{\alpha \neq \alpha} \Delta G$: ノード α 以外の電源を使われずに残っている量の総和

$\sum \Delta T_G$: ノード α に接続している送電線容量の余

第 2 図 連系系統網

Fig. 2. Interconnection of power system network.

第 3 図 最短路

Fig. 3. Shortest path.

第 4 図 ノードフロー

Fig. 4. Node-flow.

力の総和

とするとノードフロー ϕ_α は

$$\phi_\alpha = \min(\sum \Delta T_G, \sum_{\alpha \neq \alpha} \Delta G) + \Delta G_\alpha \quad \dots (4)$$

となる。ここで(4)式の適用限界について考察する。いま第5図のサブネットワークで代表させて考える。厳密にはノードフロー ϕ_1 は

$$\phi_1 = \min(\Delta T_{1,2}, \Delta G_2) + \min(\Delta T_{1,3}, \Delta G_3) + \Delta G_1 \quad \dots (5)$$

として計算されるべきであるが、実際には各単独系統はループを形成している場合が多いし、(5)式で計算するためには第6図のように S_1, S_2 のグループを検出する必要がある。このグループの検出方法として筆者の報告した手法⁽³⁾を用いればよいが、系統規模が大きくなると計算時間が極端に増加することを考慮する

第 5 図 サブネットワーク
Fig. 5. Subnetwork.

第 6 図 サブネットワーク
Fig. 6. Subnetwork.

第 7 図 ノードフロー計算手順
Fig. 7. Procedure of calculation of node-flow.

ならば常に(5)式で計算することは得策とはいえない。実際には各単独系統内でのすべてのノードに電源が接続しているわけではないので(4)式で近似計算を行なってもよいものと考えられる。(4)式によってノードフローの真値との偏りについては、系統構成にもよるがループ系統の場合にはごく少ないか全くない場合もある。樹枝状系統でも送電線容量が十分大きい場合には偏りはないと考えてよい。

いま No. 1 内の負荷の信頼度を計算するものとし、ポイントを No. 1 に設定する。No. 1 以外の各単独系統は等価な電源とみなし、この電源が連系線を通じて No. 1 に余剰電力を供給していると考えられる。

第 8 図 ノードフロー計算手順
Fig. 8. Procedure of calculation of node-flow.

系統連系による信頼度向上とはこのような観点から定量的にはあくできる。

さて、No. 1 に供給される余剰電力を求める場合、各単独系統のノードフローを計算してそれが連系線を通じて他の単独系統に流入するという手順をとる。連系系統は第 7 図のように各単独系統をノードで表わし、連系線をブランチで表わす。ノード 1 はポイントである。まず、ノード 9 を第 1 ステップ、ノード 8 を第 2 ステップにとるものとする(第 8 図)。図において No. 8 ノード 5 におけるノードフロー $\phi_{8,5}$ を求める。同様にノードフロー $\phi_{9,3}$ を求める。 $\phi_{8,5}$ は連系線 $X_{5,6}$ を通じて No. 6 ノード 6 に供給されるが、この大きさは $\min(\phi_{8,5}; X_{5,6})$ となる。同様に No. 9 ノード 3 から No. 6 ノード 2 に供給される余剰電力も決定できる。これらを下式のようにおく。

$$\zeta_2 = \min(\phi_{9,3}; X_{3,2}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\zeta_6 = \min(\phi_{8,5}; X_{5,6}) \dots\dots\dots (7)$$

したがって、第 8 図のように ζ_2, ζ_6 をそれぞれ No. 6 のノード 2, 6 に接続して No. 6 ノード 4 でノードフロー $\phi_{6,4}$ を計算すればよい。なお、第 7 図で順次端点を処理するアルゴリズムは接続行列を用いて容易に作成できる。

〈2.4〉 ループ連系 1 点連系の場合 いま、各単独系統が第 9 図のように連系されているものとする。まず第 9 図において、ループ上にない系統を検出し (No. 3, No. 8), 木連系の場合と同様 No. 8 と No. 7 との最短路を形成するノードにおいて、No. 8 の選択点でのノードフローを計算する。第 10 図のようにこのノードフローを $\phi_{8,5}$ とするとこれが連系線 $X_{5,2}$ を通じて No. 7 ノード 2 に供給される。ここで

$$\zeta_2 = \min(\phi_{8,5}; X_{5,2}) \dots\dots\dots (8)$$

とにおいて、 ζ_2 は No. 7 ノード 2 に供給される余剰電

第 9 図 ループ連系系統

Fig. 9. Loop interconnection power system network.

第 10 図 サブネットワーク

Fig. 10. Subnetwork.

第 11 図 等価ネットワーク

Fig. 11. Equivalent network.

力となる。No. 3 についても同様である。したがって、ループ上にない各単独系統をループ上に重畳した後の連系系統は第 11 図のようになる。

さて、第 11 図において No. 1 へ供給される余剰電力の計算方法は種々考えられる。たとえば、各単独系統内で余剰電力を求めて第 11 図にグループフロー法⁽²⁾を適用する方法である。しかし、この方法は計算時間の点から決して得策ではない。そこでループ連系の場合のポイントへの余剰電力を計算する方法として次の手法を提案する。

まず、第 11 図の各単独系統の余剰電力を求め (No. 1 はのぞく)、これの総和を計算する。つまり

$$A = \sum_K \sum_i \delta G \quad (K \neq \text{No. 1}) \dots\dots\dots (9)$$

K : 各単独系統, i : K 系統内のノード

第 12 図 ネットワーク

Fig. 12. Network.

第 13 図 サブネットワーク

Fig. 13. Subnetwork.

第 14 図 サブネットワーク

Fig. 14. Subnetwork.

この(9)式の A を連系線の容量で比例配分する方法である。

この手法の妥当性については、ループ系統のノードフローを計算する場合、第 12 図について考えると、単独系統 B, C の余剰電力の総和を求めると(9)式から

$$A = \sum_B \Delta G + \sum_C \Delta G \dots\dots\dots (10)$$

となる。第 12 図で連系線 (1-5), (2-6), (3-7), (4-8) を経由して系統 A に余剰電力が供給されると考えられる。ノード 5, 6, 7, 8 におけるノードフローを求める場合、全系統に直接グループフロー法を適用することは問題を複雑化することになり、また計算時間の点か

らも得策ではない。そこで第13図、第14図のネットワークを考えると第13図は連系線が2ルートであり、第14図は連系線が1ルートである。第14図の場合はノード5における余剰電力は(4)式で計算できるが、第13図の場合は連系線が2ルートであるから(4)式を直接適用できない。そこで電源余力の総和は

$$\sum \Delta G = 3 + 2 + 4 + 2 = 11$$

であるからノード5、6から流出するノードフロー ϕ_5, ϕ_6 はこのままでは一義的に定まらない。(しかし $0 \leq \phi_5 \leq \sum \Delta G, 0 \leq \phi_6 \leq \sum \Delta G$ であることは当然である)そこで ϕ_5 を(4)式で求めると $\phi_5 = 11$ となりこのあと当然 $\phi_6 = 0$ となる。(ϕ_5 が先取りするため)したがって、ノードフローについての先取りの現象を救済するために $\sum \Delta G$ を連系線容量で比例配分すれば

$$\phi_5 = \sum \Delta G \times T_5 / (T_5 + T_6) \dots\dots\dots (11)$$

$$\phi_6 = \sum \Delta G - \phi_5 \dots\dots\dots (12)$$

となる。 $T_5 = T_6$ ならば $\phi_5 = 5.5, \phi_6 = 5.5$ となりこれらを各ノードにおけるノードフローとみなすことができる。このような手順により各連系線を通過させるべきノードフローの一意性も保障される。 T_5, T_6 はそれぞれ連系線(1-5), (2-6)の容量である。第9図のループ連系系統はポイント No. 1 に2ルートの連系線が接続している場合であるが、ポイント No. 1 に3ルート以上の連系線が接続している場合にも同様の理論を適用することができる。しかし、ポイント No. 1 への連系線が1ルートの場合は、ループ上にはない系統をループ上の系統に重畳させて上記と同様の手順によってノードフローを計算することができる。

〈2・5〉 木連系多点連系の場合 多点連系の信頼度計算は1点連系のそれにくらべて解析が相当複雑になる。多点連系の一般論にはいる準備として第15図に示されると2連系2点連系系統についての解析方法について述べる。

ポイントを No. 1 にとり、No. 2 から余剰電力が No. 1 に供給されるものとする。No. 2 のノード3とノード4とは接続している。この場合 No. 2 内の送電線 $T_{3,4}$ はセルフループを構成しているものと考え(この仮定の妥当性については $T_{3,4}$ の存在により No. 2 のネットワークの結合力が十分あるものと考えれば No. 2 内の供給余剰電力がノード3あるいはノード4のいずれか一方を通過して、No. 2 の外部へすべて流出できるものと解釈される)、No. 2 のノード3とノード4とを単一のノードとみなせばよい。この状態は第16図のように表わされる。ここで No. 2 内の供給余剰電力は $\sum_{No.2} \delta G$ となり、これが連系線 $X_{3,2}$ と

第15図 2連系系統回路網

Fig. 15. System interconnected by 2 routes.

第16図 セルフループを含む回路

Fig. 16. Circuit containing self loop.

と $X_{3,3}$ を通じて No. 1 に供給される。このとき No. 1 ノード2に供給される余剰電力 ζ_2 は

$$\zeta_2 = \min(X_{3,2}; \phi \cdot \alpha_2) \dots\dots\dots (13)$$

No. 1 ノード3に供給される余剰電力 ζ_3 は

$$\zeta_3 = \min(X_{3,3}; \phi \cdot \alpha_3) \dots\dots\dots (14)$$

ただし

$$\phi = \sum_{No.2} \delta G \dots\dots\dots (15)$$

$$\alpha_2 = X_{3,2} / (X_{3,2} + X_{3,3}) \dots\dots\dots (16)$$

$$\alpha_3 = X_{3,3} / (X_{3,2} + X_{3,3}) \dots\dots\dots (17)$$

これに対して No. 2 ノード3とノード4とのブランチがオフである場合は多少 No. 2 内の結合力がノード3とノード4とがオンの場合にくらべてゆるいので、厳密にはグループフロー法⁽²⁾によって No. 1 の信頼度を計算すべきであるが、一般には計算規模が莫大に増加する。したがって、この場合も(13), (14)式で計算を実行するものとする。(このことについては、供給余剰電力にくらべて連系線容量が相当大きいことが多いので成立するものと考えてさしつかえない。)上記の手順により樹枝状多点連系統の信頼度を計算で

総建設費上限を大きくすると信頼度は上昇するが、電源予備力が一定であれば無制限には上昇しない。

ただし、事故率については

(i) 発電機

送電端出力 70.3, 116.7, 163.1MW 機

平均事故停止時間 5時間

平均運転時間 61 日

事故率 $5/(61 \times 24) = 0.003415$

(ii) 送電線

平均事故停止時間 1時間

平均運転時間 200 日/100km

事故率 $1/(200 \times 24) = 0.0002083$

とする。送電線容量は本例題では安全電流から決定した。

容量 $= \sqrt{3} \times 196 \times \text{安全電流}$

第 19 図 木連系 1 点連系系統

Fig. 19. Tree interconnection system of one point connection.

第 20 図 ループ連系 1 点連系系統

Fig. 20. Loop interconnection system of one point connection.

とする。ここで 196 はキロボルト幹線系統電圧を意味する。ただし安全電流は

ACSR 240□mm: 600A

ACSR 410□mm: 840A

ACSR 耐熱 410□mm: 1,365A

である。本例題の計算時間は

(a) 単独系統: 約 4 分

(b) 木連系 1 点連系系統: 約 6 分

(c) 木連系多点連系系統: 約 6 分

(d) ループ連系 1 点連系系統: 約 7 分

(e) ループ連系多点連系系統: 約 7 分

であった。また、電源、送電線および負荷の単位はメガワットである。なお連系線については各ルートとも $204 \times 2 \text{ MW}$ の仕様であり、各連系線の結線図は、第 19 図～第 22 図に示す。

第 21 図 木連系多点連系系統

Fig. 21. Tree interconnection system of multi point connection.

第 22 図 ループ連系多点連系系統

Fig. 22. Loop interconnection system of multi point connection.

以上の計算結果から、次の点を指摘することができる。

単独系統の信頼度についてみると、No. 1, No. 2, No. 3 いずれの負荷についてもループからはずれている負荷はループ上の負荷よりも信頼度が低い。

次に木連系 1 点連系の場合についてみると、No. 1, No. 2, No. 3 すべての負荷についても連系線のないときより信頼度は向上している。

一方、木連系多点連系についてみると、これは No. 1 と No. 3 との負荷の信頼度は木連系 1 点連系の場合と同一で、No. 2 の負荷の信頼度はいずれも木連系 1 点連系の場合よりも向上している。この理由は No. 2 への連系線が 2 ルートであるため、No. 1 からの供給剰剰電力を、より有効に利用しているためと判断できる。また No. 3 の信頼度が木連系 1 点連系と同一である理由については、No. 1 から No. 3 への供給ルートが 1 ルートであるためである。No. 1 の信頼度が木連系 1 点連系と同一である理由については、No. 1 は No. 3 と No. 2 との両系統から供給されているために木連系 1 点連系とくらべて連系線の結合状態の差は大きくひびかないためと判断できる。

次にループ連系 1 点連系について考えてみる。この場合 No. 1, No. 2, No. 3 いずれの負荷についても木連系 1 点連系から木連系多点連系への信頼度の上昇ほどは木連系多点連系とくらべてみると上昇していない。特に No. 2 の *D, E, F*, No. 3 の *H, I, J* の信頼度は、木連系多点連系のそれと同一の値を示している。No. 1 の *A, B, C* いずれも木連系多点連系の信頼度よりも上昇している理由については、木連系の場合は（1 点、多点ともに）No. 1 の 2 箇所の連系地点への供給電力配分の大きさが相当異なる場合があるが、（No. 2, No. 3 の電力余力の大きさの違いにより）ループ連系の場合は No. 1 の 2 箇所の連系地点への供給電力配分が均等化されるために、No. 1 内のすべての負荷に有効に電力余力を配分するためである。

次にループ連系多点連系についてみると、ループ連系 1 点連系の場合よりも全系統について信頼度は向上している。これはループの結合状態がループ 1 点連系のそれよりも強固であるためであるが、特に No. 1 と No. 3 の信頼度の上昇が No. 2 のそれと比較して顕著である。総じて木連系よりもループ連系のほうが信頼度の向上を期待できる。

次に電源予備力の信頼度に及ぼす影響について考え

る。系統連系を行わない場合の予備容量の信頼度に及ぼす影響については飽和特性を持つことが確認されているが、⁽²⁾ 本例題では予備率 5~20% に設定した。電源設備の最大ユニット容量とその予備力との間には各電源の事故率が影響しこの事故率は同一に設定されているからこの点については一応無視している。

第 3 表で木一点連系の場合、No. 1, No. 2, No. 3 のマージンをそれぞれ 4%, 3%, 3% として信頼度を計算してみると第 2 表の 5% マージンの連系を行わないときの信頼度とほぼ等しい値になることは注目すべきである。このことは系統連系を行なうことによって電源予備力は各単独系統の場合のそれぞれの和より少なくなることを示している。また、予備電源の位置による影響については、連系を行わない場合には各負荷の信頼度に各単独系統内で影響を与える。しかしこの点については系統構成によって影響が少ないこともある。（ネットワークの結合力が強固な場合）連系を行なった場合、本例題 No. 1 の予備電源の位置をかえて計算を実行したが、他の No. 2, No. 3 の信頼度の値には影響を与えなかった。（マージン 5%）しかしマージンを大きくすると予備電源の位置によって他系統の信頼度の値に影響を及ぼすことは十分予想される。なお、系統負荷の不等性に関しては、本例題では各単独系統の負荷曲線の形体を変えて実行しており、当然負荷の不等性が信頼度計算結果に影響を及ぼしていることが確認された。

4. む す び

以上で連系系統の信頼度計算手法を述べ、モデル系統についての試算例を示した。終わりに種々ご指導をいただいた北海道大学工学部教授 小池東一郎氏、同学助教授 宮本衛市氏に厚く感謝申し上げます。なお、本研究には、北海道大学大型計算機センター FACOM 230/60 を使用したことを記して感謝の意を表する次第である。

（昭和 47 年 5 月 22 日受付，同 48 年 4 月 16 日再受付）

文 献

- (1) 村山：電学誌 91, 674 (昭 46-4)
- (2) 村山：電気学会論文誌 92-B, 250 (昭 47-4)
- (3) 村山：情報処理 12, 7, 439 (昭 46-4)
- (4) 関根：電力系統工学 236 (昭 41-5)
- (5) 村山：北海道大学修士論文