適用範囲拡大のための不平衡潮流計算手法の数値計算性能の改善

正員 今井 伸一* 正員 鈴木 治彦*
正員 伊庭 健二** 正員 藤原 修平**

Improvement of Unbalanced Load Flow Program for Large Power Systems

Shinichi Imai*, Member, Haruhiko Suzuki*, Member, Kenji Iba**, Member, Shuhei Fujiwara**, Member

The idea of unbalanced power flow calculation was proposed many years ago. At that time, however, the needs for such techniques was not an arguent issue. But modern power system networks are comprised of long untransposed transmission lines. Therefore, for some kind of analysis, it is now almost impossible to treat a system as though it were a symmetrical network. The aims of most previous studies were oriented to solve voltage/current imbalance in local or small system because local imbalance was a serious concern. This is still an important issue, but more recently our needs have become concentrated on practical bulk power systems, since principal EHV lines are entirely untransposed.

Following such a background, we have developed a practical unbalanced load flow program. This program was developed for steady state analysis of large scale of practical networks under many possible unbalanced conditions.

キーワード：電力系統，三相潮流計算，非撚架送電線，潮流計算

Keywords: power system, three phase power flow calculation, untransposed transmission lines, power flow calculation

1. はじめに

電力系統の送電網は従来まで、気中撚架が可能な送電線が多いため、送電線網の平衡はおおむね維持できたが、超高圧送電網の拡充につれて非撚架送電線が系統全体に占める割合が高くなり、非撚架送電線によって発生する電圧・電流の不平衡は無視し得なくなりつつある。不平衡電流は発電機の逆相電流や変圧器の零相循環電流として機器の加熱の原因となるため十分な解析が必要となるが、系統に電圧・電流の不平衡が観測されても状況を再現したり、その原因が下位系の負荷なのか、送電線の不平衡なのかを把握することは容易ではなかった。

このような背景からこれまで筆者らは送電線の不平衡や負荷、補償機器の不平衡を含む系統で不平衡電圧・電流を計算する手法の検討を行い、収束性・精度等の検証⁽¹⁾や機器モデルの充実⁽²⁾について報告を行ってきた。

三相潮流計算は一般に収束が難しいと言われており⁽⁶⁾、また単相法の9倍の非零要素を持ち数値計算上の不安定が懸念される。近年、三相不平衡潮流計算は、EMTPを用いた逐次代入法の検討⁽³⁾、配電系統への適用を目的とした高速化、機器モデル検討⁽⁴⁾⁽⁵⁾などが検討されているが、大規模系統への適用との観点からは未解決な問題が多く残されている。このため基幹系統に地域供給系統まで含めた大規模系統に三相不平衡潮流計算を適用することは難しかった。

そこで本稿では現在までに開発してきた手法⁽¹⁾を改良することで制約のあった系統規模を拡張し、数値計算上の安定性を高める機能向上が図れたので報告する。

2. 不平衡潮流計算の現状

不平衡潮流計算についての研究は古くから多くなされており、基幹系統については基本的なモデリングや解法については既に確立していると考えられる。しかし現状の技術では基幹系統から地域供給系統まで含めた大規模系統を解析するには次の問題が残されている。

(1) 解析規模 たとえば東京電力の全系を詳細に模擬するには少なくとも1000母線の規模が必要となる。しかも三相詳細の解析では数値計算上の次元が単相の3倍となりヤコビ行列のLU分解等の数値計算の精度安定性の維持が難しく、適用された実績もない。

* 東京電力 (株)

〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3

Tokyo Electric Power Company

1-3, Uchisaiwai-cho, 1-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8560

** 三菱電機 (株)

〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-2-3

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION

2-2-3, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310

(2) 収束の安定性 三相潮流計算は収束可能な初期値の範囲が狭く、単相潮流計算のようにフラットスタートでは収束に至らない場合があることを筆者らは経験している。このため三相潮流計算の初期値として詳細な単相潮流計算の結果が必要不可欠となっている。しかし系統の不平衡が大きい場合には詳細な単相潮流計算を用いても安定な収束が得られるとは限らず、出来るだけ収束特性の優れた計算手法が望まれる。

3. 機器モデル

開発した不平衡潮流計算プログラムにおける系統構成要素の模擬方法や表現方法について述べる。

〈3・1〉 不平衡線路 個々の送電鉄塔について導体の地上高や間隔、線種などを設定し π 型等価回路の線路定数を作成する。計算にはEMTPの線路定数計算機能を用い、これをデータベース化しておく。

〈3・2〉 発電機 発電機は内部電圧が平衡で端子電圧と電流に不平衡を許容するように模擬する必要がある⁽⁷⁾。発電機端子電圧を三相平衡電源として扱うと、発電機に流れる逆相電流が過大に現れ現実と一致しない。そこで図1に示すように発電機の背後インピーダンスの背後に三相平衡電源をもつ発電機モデルを採用している。背後インピーダンスは正相、逆相、零相のインピーダンスを設定する。(4)式に示すように、正相と逆相のインピーダンスが異なる場合はABC相に展開された背後インピーダンス Z_g は非対称行列となる。発電機端子の母線指定値を満たすように三相平衡の背後電圧の電圧の大きさ E_g と位相 δ_g を計算する。

発電機の母線指定は単相潮流計算と同様に発電機端子の諸量として各相電圧の平均値、各相の発電機出力の合計を指定する。

母線指定の方法はPQ指定、PV指定、スラック母線が設定可能であり、指定方法に応じて拘束条件(1)~(3)式を選択する。表1に母線指定の方法と拘束条件の組み合わせを示す。

$$P_{set} = P_a + P_b + P_c \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{set} = Q_a + Q_b + Q_c \dots \dots \dots (2)$$

$$V_{set} = (V_{ta} + V_{tb} + V_{tc})/3 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

P_a, P_b, P_c : 発電機端子有効電力出力 (abc相)

表1 発電機母線の指定方法

Table 1. Node Specification of generator terminal.

Type	Specification
PV Specified Node	Eq. (1), Eq. (3)
PQ Specified Node	Eq. (1), Eq. (2)
Q Specified Slack Node	Eq. (2)
V Specified Slack Node	Eq. (3)

Q_a, Q_b, Q_c : 発電機端子無効電力出力 (abc相)

V_{ta}, V_{tb}, V_{tc} : 発電機端子電圧 (abc相)

$$Z_g = T \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} T^{-1} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 T は対称座標変換行列

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \frac{1}{2}(-1 + j\sqrt{3}) \dots \dots (5)$$

Z_0, Z_1, Z_2 : 発電機の正、零、逆インピーダンス

〈3・3〉 変圧器 変圧器巻線を正確に模擬することは三相不平衡潮流計算では特に重要である。開発プログラムにおいてはYY, Y Δ , Δ Yの任意の結線が設定可能である。相座標形式による変圧器の数式表現は複雑ではあるが、変圧器の相互誘導ブランチを重ね合わせによって表現することが提案されており、この方法を採用することで複雑な巻線でも容易に実現することが可能となっている⁽¹⁰⁾。

〈3・4〉 負荷 負荷モデルについては既に確立しているが縮約して表現する場合のパラメータの決定が難しく、その模擬は難しい。また、定電力/定インピーダンス/定抵抗の各モデルによる差や、定インピーダンスモデルにおける三相結線方式の差は解析結果に大きな影響を与える。

● 指定値: 各相(Y結線)や相間(Δ 結線)の負荷量を指定する。負荷特性として定インピーダンス特性(調相など)、定電力特性を設定する。

● 結線方法: 負荷の結線方法としてY結線(中性点接地)、 Δ 結線の2種類を考慮する。Y結線は負荷へ零相電流が流れることを許すこととなる。高圧系統で負荷を模擬する場合に用いる。 Δ 結線は負荷側に零相電流が流れないので比較的電圧階級の低い変電所などの負荷を模擬する場合などに用いる。

図1 発電機の内部表現

Fig. 1. Generator model.

図2 負荷モデル

Fig. 2. Load model.

4. 大規模化に伴う改良点

筆者らは文献(1)において東京電力基幹系統を簡略模擬した200母線程度の系統について検討を行い既に良好な結果を得ている。本研究ではさらに基幹系統から地域供給系統まで含めた規模(1000母線程度)で安定して計算が可能とするために改良を行った。

〈4・1〉電流方程式の導入 非線形方程式である電力方程式は上め解と下め解の2つの解をもち、浮遊母線の下め解として電圧零を持つ(電圧=0, 注入電力=0)。このためニュートンラプソン法を用いて反復計算を行った場合、反復計算を開始する電圧初期値によっては電圧=0を解として求めてしまうことがある。三相潮流計算においては変圧器中性点(抵抗接地)など反復計算の初期値の設定が困難な母線においては電圧解として往々にして低め解である電圧零を求めてしまうことを筆者らは経験している。

このような問題の対策として浮遊母線においてはPQミスマッチ($\Sigma P = 0$)ではなく電流ミスマッチ($\Sigma I = 0$)で計算すると効果的であることがよく知られている(例えば(8))。この方法を三相不平衡潮流計算にも採用することで特に図3に示す例について安定して計算が可能となった。

〈4・2〉直角座標系の採用 電圧の座標系として直角座標系を用いた。この場合、浮遊母線の電流方程式は線形となるため第2回目以降の反復計算においては浮遊母線の残差は零となり収束性の改善が期待できる。

〈4・3〉非接地部分系統の処理 変圧器の3次Δ巻線の先などに接地機器がない場合に非接地系統となり零相が浮いた状態(零相が非接地分離系統)となる。これは一般によく知られている現象であり、対処法として例えば、微小アドミタンスを母線に付加⁽¹⁾、1線を接地⁽⁹⁾、2相回路としてモデル化を行う⁽⁴⁾などの方法が知られている。

大規模三相潮流計算においては、例えば無接地系統に対し微小アドミタンスを大地に対し付加する方法は数値計算上不安定となり困難である。またその微小アドミタンスの値の設定が困難である。1線を接地する方法は数値的に安定であるが、接地した相の電圧が零となるため計算結果の後処理に煩雑な処理が必要となる。非接地系統部分について2相でモデル化する場合、接地・非接地の混在する系統においては、同一の機器について三相と二相の2つのモデ

ル化が必要となり処理が煩雑となる。

そこで本稿ではこの問題を回避するために次の新たな方策を開発した。これは零相が非接地分離になる部分系統の中で一つの母線(abc相)を選び、この母線のabc各相のノード電流方程式((6)式)の中に $V_0 = 0$ となる式 R_0 を付加するものである((7)式)。

Δ巻線以降が非接地の系統では、物理的にも対地間電圧が不安定となる現象が観測される(例えば中性点不安定現象)。このため実系統では所内変圧器を抵抗接地するなどしてこの現象を防止する。しかしシミュレーションにおいてもこれらの機器モデルを省略する場合には潮流計算においても中性点不安定現象の発生するモデルを解くことになり、数値計算的な解の不定問題も同時に発生する。そこで無接地の場合には実用上関心の薄い常時の零相電圧をゼロに設定して算出することとした。なお、この仮定は対地電圧に対する仮定であるため、線間電圧に起因する零相循環電流の計算結果には影響を与えない。

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \sum_{j=1,n} Y_j \cdot V_j = 0 \\ I_b &= \sum_{j=1,n} Y_j \cdot V_j = 0 \\ I_c &= \sum_{j=1,n} Y_j \cdot V_j = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \sum_{j=1,n} Y_j \cdot V_j + R_0 \\ I_b &= \sum_{j=1,n} Y_j \cdot V_j + R_0 \\ I_c &= \sum_{j=1,n} Y_j \cdot V_j + R_0 \\ R_0 &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = V_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

(a) 1相を接地 (b) 微小アドミタンス付加 (c) $V_0 = 0$

図4 非接地系統に伴う解不定に対する処理の例
Fig. 4. Provision of indefinite solution of voltage.

表2 非接地系統の処理の評価

Table 2. Provision for indefinite solutions.

Provision	Numerical stability	Complexity of modeling
Ground one phase	○	△
Add small admittance	×	○
Model as two phase	○	△ (*)
Add equation of $V_0=0$	○	○

*: Assume a mixed system with a grounded and non-grounded system

(a) 変圧器中性点

(b) 弱連結回路

図3 電流方程式の導入が効果的な例

Fig. 3. Situation applying current equation is effective.

I_a, I_b, I_c : 非接地部分系統の代表ノードへの注入電流
(ABC 相)
 V_a, V_b, V_c : 非接地部分系統の代表ノードの電圧
(ABC 相)
 Y : 線路アドミタンス
 n : ノード数

図 5 対象系統

Fig. 5. Test case.

表 3 A 相の電圧計算結果 (単位: pu)

Table 3. Comparison of numerical result (unit: pu).

Node	(1) Proposed	(2) EMTP	(1) - (2)
1	0.9972748	0.9972755	-0.6637×10^{-6}
4	0.9710168	0.9710100	6.8523×10^{-6}
22	0.0429429	0.0429426	0.3043×10^{-6}
32	0.0446235	0.0446232	0.3183×10^{-6}

図 6 反復回数と残差

Fig. 6. Number of iterations and rsesidual.

● 275 kV 平行 2 回線送電線 (100 km 相当) の 1 回線停止を行っている。このため、誘導により 2 号線に誘導電圧が生じる。

● 負荷端 (ノード 4) は YΔ 結線の変圧器によって零相が分離している。このため、〈4.3〉節で述べた非接地部分系統に対する考慮が必要となる。

● 負荷は Δ 結線とした。

〈5.1.2〉 考 察

(1) 計算結果 表 3 に A 相の電圧計算結果を示す。EMTP との電圧絶対値の差異は最大 0.00003 (%) 程度と高い精度であり、プログラムの妥当性を検証できた。

また、電流ミスマッチの方程式を採用することにより、両端が開放されている 2 号線の電圧 (ノード 22, 32) も妥当な計算結果が得られている。

相互誘導により誘起される電圧などは線路定数データの精度におおきく左右され、またそのデータについても正確な値を得ることは難しい⁽¹¹⁾。しかし数値計算上安定して計算可能であることや電圧の傾向を得ることが可能であることは実用の計算プログラムとして有用な機能であると考ええる。

(2) 収束特性 零相非接地系統部分の電圧不定対策についてその収束特性を検討した。収束特性についてはニュートンラプソン法 (以後、NR 法) の各反復における、①反

この方式は非接地部分系統の代表ノードに対し、対称座標法での零相回路のみ接続する仮想アドミタンス Y_{abc} を大地間に挿入することと等価である。非接地部分系統は電源に接続されていないので、 $V_0 = 0$ の条件を部分系統に追加していることを意味する。なおこの仮想アドミタンスは ((8) 式) において $Y_0 = 1.0$, $Y_1 = Y_2 = 0.0$ と設定することで表現可能である。

$Y_0 = 1.0$, $Y_1 = Y_2 = 0.0$ と設定した場合 Y_{abc} は要素が全て同じ値の相互誘導をもつアドミタンスマトリクスとなり、図 4(c) に示す様に仮想アドミタンスを当該ノードに接続した系統になる。この対策により、対策前には不定であった非接地部分系統の零相電圧は規定される。なお、非接地部分系統は電源には接続されていないので、仮想アドミタンスには零相電流は流れない。このため Δ 巻線に流れる零相循環電流の計算結果にも悪影響がない。また正相、逆相のアドミタンスはゼロ (インピーダンス = ∞) なので正相、逆相電流も流れない。このため結果的には仮想アドミタンスには abc 相とも電流が流れず電力も消費しない。

$$Y_{abc} = T \begin{bmatrix} Y_0 & & \\ & Y_1 & \\ & & Y_2 \end{bmatrix} T^{-1} = \begin{bmatrix} y & y & y \\ y & y & y \\ y & y & y \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

Y_{abc} : 非接地部分系統の代表ノードに付加する
仮想アドミタンス (相座標系で表現)

Y_0, Y_1, Y_2 : 非接地部分系統の代表ノードに付加する
仮想アドミタンス (対称座標系で表現)

T : 対称座標変換行列 ((5) 式参照)

y : Y_{abc} 行列の要素

($Y_0 = 1.0$, $Y_1 = Y_2 = 0.0$ の場合, $y = 1/3$)

5. 妥当性の検証と適用例

計算方法の妥当性・計算精度を検証するために、収束特性、計算結果の EMTP との比較を行った。

不平衡潮流計算と EMTP との比較においては、不平衡潮流プログラムで得られた発電機内部電圧値と自動生成した負荷のインピーダンスデータを EMTP のデータに書き込み EMTP を実行することで両者の比較を試みた。

〈5.1〉 小規模系統への適用例

〈5.1.1〉 対象系統 図 5 に対象系統を示す。対象系統は以下の特徴を持つ。

図 7 反復回数と推定値の修正量

Fig. 7. Number of iterations and windage.

図 8 反復計算と非接地電圧の振る舞い
(ノード 4 に $C=10^{-6}$ [pu] 付加)

Fig. 8. Behavior of voltage at node 4
(Add small capacitor of 10^{-6} [pu]).

復回数, ②母線電圧の指定値からの残差 (以後, 残差), ③母線電圧の修正量 (以後, 修正量) について評価を行った。

負荷端 (ノード 4) に対し $V_0 = 0$ の条件を追加した場合と微小の大地静電容量を付加した場合の反復回数と残差を図 6 に示す。 $V_0 = 0$ の条件を追加した場合には NR 法の特徴である 2 次収束を見せ迅速に収束している。一方, 微小の大地静電容量付加の場合, 残差だけから判断する場合, 負荷端に追加する静電容量が小さくても一見問題が発生しないように見られる。しかし各反復における母線電圧の修正量を見ると, 負荷端に追加する静電容量が小さくなるに従い, 修正残差が収まらず, 負荷端の電圧が不安定となっている (図 7)。

図 8 は NR 法の各反復 (10~13 回) における負荷端の電圧の振る舞いを示す。NR 法の各反復において相間の電圧の関係を満たしながらも大地間の電圧が不定となっている状況が確認できる。なお, 負荷端の相電圧は振動しているが線間電圧は安定しているので残差は零となっている。

付加する静電容量が大きければ計算上安定するが計算結果に不要な誤差が混入する。付加する静電容量を小さくすると収束特性は悪化する。このため適切な静電容量を与えれば良いが大規模システムにおいては適切な値を設定すること

表 4 解析システムの規模

Table 4. Size of practical test case.

Type of elements	Number
Nodes (in single phase)	909
Generators	149
Unbalanced transmission lines	179
Transformers	261

表 5 計算規模

Table 5. Memory requirement of practical test case.

Type	Number	
	Single phase Power flow	Unbalanced Power flow
Number of nodes	909	2,727
Matrix size of Jacobian	1,818	6,348
Non-zero elements	9,023	100,735

表 6 母線電圧計算結果の例 (単位: pu)

Table 6. Comparison of numerical result (unit: pu).

Phase	(1) Proposed	(2) EMTP	(1) - (2)
A	1.0527715	1.0527710	0.4499×10^{-6}
B	1.0700306	1.0700296	0.9344×10^{-6}
C	1.0687997	1.0687973	2.4004×10^{-6}

は難しく, 安定した計算を行える $V_0 = 0$ の条件の追加は不可欠であると考えられる。

〈5・2〉 大規模システムへの適用例

〈5・2・1〉 対象システム 大規模システムでの検証を行うため東京電力の 154 kV 以上の地域供給システムを含めた全システムを対象に検討を行った。表 4 に対象システムの規模を示す。筆者らの調査の範囲においては, 今回対象としたレベルの大規模の詳細な三相潮流計算例は報告されていない。表 5 に母線数とヤコビアン非零要素の総数を示す。単相潮流計算においては母線数が 3 倍になった場合でも疎行列性が維持される大規模システムの場合, ヤコビ行列の非零要素の増加はおおよそ 3 倍程度であるが, 単相を三相に展開した場合, abc 相間の密接続により母線数は 3 倍に増加するだけでなくヤコビ行列の非零要素は 9 倍になる。このため例えば, 同じ 2727 母線の潮流計算を解く場合, 単相の 2727 母線の潮流計算を解くよりも, 3 相の 2727 母線の潮流計算を解く方が数値計算的に困難である。

〈5・2・2〉 考察

(1) 計算結果 計算結果の一部を示す。小規模システムの場合と同様, EMTP との電圧絶対値の差異は最大 0.0002 (%) 程度と高い精度であり良好な一致が見られた。

(2) 収束特性 図 9 に反復回数と残差を示す。

文献 (1) において筆者らが適用した極座標形式・PQ ミスマッチの潮流計算を今回の大規模システムに適用したが収束には至らなかった。

今回は, フラットスタートを初期値とした場合でも安定的に収束し電圧解が得られた。文献 (1) においてフラット

図 9 反復回数と残差

Fig. 9. Number of iterations and residual.

スタートを初期値にすると収束性が悪く、詳細な単相潮流計算が必要不可欠であると報告したが、この改善で三相潮流計算の初期値を作成するために詳細な単相潮流計算を行う必要がなくなり、計算処理の負担が軽減できた。

6. おわりに

本稿では、地域供給システムを含めた大規模システムに三相の不平衡を考慮した潮流計算を適用するために、モデルや解法を改善し、良好な結果を得たことを報告した。

電圧・電流不平衡の原因は基幹系統の送電線非燃架から、地域供給系統、配電系統の不平衡機器、不平衡負荷に関わるためこのような大規模解析のニーズも高まっている。

本稿で開発した技術はこれに寄与するものと期待している。今後は分散型電源の普及に伴う諸問題の解析についてこの技術を適用していきたい。

(平成 14 年 8 月 7 日受付, 平成 14 年 12 月 5 日再受付)

文 献

- (1) M. Suzuki, T. Ishii, M. Kamio, H. Suzuki, and K. Iba: "Development of Unbalanced Load Flow Program for Large Power Systems", *T. IEE Japan*, Vol.112-B, No.10, pp.937-944 (1992-10) (in Japanese)
鈴木・石井・神尾・鈴木・伊庭:「大規模システムにおける不平衡潮流計算手法の開発」, 電学論 B, 112, 10, pp.937-944 (1992-10)
- (2) 水野・福島・黒沢・福井・伊庭:「4 回線併架送電線モデルを含む 3 相不平衡解析システムの開発」, 平 7 年電気学会全国大会, No.6 (1292)
- (3) X. Cao, A. Kurita, Y. Tada, and H. Okamoto: "Development of Unbalanced Power Flow Calculation Method", *Proc. of The Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, 319 (2000) (in Japanese)
曹・栗田・多田・岡本:「三相不平衡潮流計算手法の開発」, 平 12 年電力・エネルギー部門大会, 319 (2000)
- (4) Y. Fukuyama and Y. Nakanishi: "Fast Load Flow for Radial Power Systems Using Parallel Processing", *T. IEE Japan*, Vol.116-B, No.1, pp.20-26 (1996-1) (in Japanese)
福山・中西:「並列処理を用いた放射状系統高速潮流計算」, 電学論 B, 116, 1, pp.20-26 (1996-1)
- (5) T. Oomori, T. Genji, T. Yura, T. Watanabe, S. Takayama, and Y. Fukuyama: "Development of Equipment Models for Fast Distribution Three Phase Unbalanced Load Flow Calculation", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.2, pp.197-206 (2002-2) (in Japanese)

大森・元治・山良・渡辺・高山・福山:「配電系統向け高速三相不平衡潮流計算用機器モデルの開発」, 電学論 B, 122, 2, pp.197-206 (2002-2)

- (6) 田中・神永:「三相潮流計算手法の収束特性に関する一検討」, 電気学会研資, PE-95-8 (1995)
- (7) K.A. Birt, El-Abiad, et al.: "Three Phase Load Flow Program", *IEEE PAS-95* (1975-1/2)
- (8) K. Takenaka and T. Nagao: "Multisolviton Load Flow and Index of Voltage stability", *Central Research Institute of Electric Power Industry, T87092* (1988) (in Japanese)
竹中・長尾:「潮流多根解析手法の開発と電圧安定性指標への応用」, 電中研報告, T87092 (1998)
- (9) "Floating Delta connection", *ELECTRO MAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM (EMTP) Rule Book Mode 39*, Rev., p.12j (1984-6)
- (10) M.A. Loughton and G.T. Stone: "M-to N-phase transformer models in phase co-ordinates", *IEE Proc.*, Vol.132, Pt.C, No.1 (1985)
- (11) I. Kouda, Y. Fuwa, Y. Noro, S. Sato, and T. Kojyo: "Study of Transmission Line Model for Three Phase Load Flow and Factor of Unbalance", *The Papers of Technical Meeting on Power Engineering, IEE Japan*, PE98-62 (1998) (in Japanese)
香田・不破・野呂・佐藤・小城:「三相不平衡潮流計算のための送電線モデルと不平衡発生要因の検討」, 電気学会電力技術研資, PE98-62 (1998)

今井伸一 (正員) 1987 年大阪大学卒業, 1989 年大阪大学大学院工学研究科修了。同年東京電力入社。1995 年より系統保護リレーの計画・開発業務に従事。現在同社系統運用部系統保護グループマネージャー。電気学会, IEEE 会員。

鈴木治彦 (正員) 1968 年 12 月 23 日生。1991 年 3 月横浜国立大学電子情報工学科卒業。同年 4 月, 東京電力 (株) に入社。現在, 系統運用部に系統保護リレーの計画・開発業務に従事。

伊庭健二 (正員) 1955 年 7 月 22 日東京生まれ。1980 年早稲田大学大学院修士課程 (電力システム工学専攻) 修了。同年三菱電機 (株) 入社。1983 年米国 Westinghouse 社にて研修。制御製作所, および中央研究所にて電力系統の計画・解析の研究開発に従事。現在, 三菱電機 (株) 社会ソリューション事業所システムインテグレーション部社会システムインテグレーション一課課長。主として電力系統の計画・解析, 新配電系統の研究開発に従事。工学博士。IEEE Senior Member。

藤原修平 (正員) 1967 年 2 月 22 日生まれ。1992 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年 4 月, 三菱電機 (株) 入社。おもに系統計画・解析業務, 新配電系統構想の研究開発に従事。