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

正員 大森 俊也 正員 元治 崇 正員 由良 俊樹 (関西電力)

正員 渡辺 拓也 正員 高山 信一 正員 福山 良和 (富士電機)

Development of Equipment Models for Fast Distribution Three Phase Unbalanced Load Flow Calculation

Toshiya Oomori, Member, Takamu Genji, Member, and Toshiki Yura, Member, (Kansai Electric Power Co., Inc)

Takuya Watanabe, Member, Shinichi Takayama, Member, and Yoshikazu Fukuyama, Member, (Fuji Electric Co., Ltd.)

This paper presents distribution system equipment models for the fast distribution three phase unbalanced load flow calculation. Recently, number of distributed generators introduced into distribution systems has been increasing and detailed system analysis using load flow calculation has been eagerly awaited. Moreover, since many distribution systems loads are composed of single phase loads, three phase unbalanced load flow calculation is required for the distribution system analysis. Although the fast distribution three phase unbalanced load flow calculation has been developed, various equipment models considering interconnection of distributed generators have not been developed yet in Japan. This paper develops practical equipment models such as various distributed generators, voltage control equipment, and loads for fast three phase unbalanced load flow calculation in distribution systems. The feasibility of the developed models is verified and demonstrated on practical distribution system models with promising results.

キーワード：配電系統，分散電源，機器モデル，三相不平衡潮流計算

1. まえがき

従来、配電系統は、配電用変電所から末端に向かって、潮流が一方方向に流れる事を前提にした系統運用・制御が行われてきた。しかし、近年の規制緩和の進展により分散電源の導入が進んでおり、この際、逆潮流もありうる事から、配電系統内の電圧プロフィールはより複雑化し、従来型の配電系統の管理・運営、制御手法を変更する事が必要になると考えられる。特に、電圧は、電力品質の1つとして顧客の端子電圧が法規により規定されており、きめ細かな電圧監視・制御手法の確立が必要である。従来の電圧制御は、変電所バンク及び各フィードに必要に応じて設置されるSVR (Step Voltage Regulator) のLDC (Line Drop Compensator) 機能等によって実現されてきた。しかし、分散電源連系時には、一方方向のみの潮流に対応し、しかも動作が緩慢なこれらの制御機器だけでは対応が困難な事が考えられるので、これに対応した電圧制御方式の検討が必要である。また、分散電源が多数連系される場合には電圧変動が複雑になる事も考慮すると、パワエレ機器による新たな電圧制御方式や、パワエレ機器のSVRとの協調制御も検討する必要がある⁽¹⁾。つまり、配電系統では、新しい機器の導入を前提とした上で、顧客での自律的な制御も含めたきめ細かな電圧監視・制御手法を確立していく事が必要で

ある。

配電系統においては、従来、回路計算を用いた解析が多く行われてきたが⁽²⁾、上述の様な分散電源やパワエレ機器などの新規導入機器により、電圧プロフィールの複雑化、及び、増加しつつある定電力負荷特性を考慮した場合、きめ細かな電圧監視・制御の前提となる電圧分布計算には、潮流計算を利用する事が必要である。また、配電系統は、単相負荷が多い事から不平衡性を有し、末端部での不平衡性も十分に検討する必要がある。つまり、系統の潮流状態を把握することが、様々な監視・制御の基本となる事も考慮すると、高速な配電系統用の三相不平衡潮流計算が必要となる。ループ状の送電系統では、従来、ニュートンラフソン法(以下、NR法)を用いた潮流計算が利用されてきた⁽²⁾。これに対し、配電系統では、放射状の系統特性を考慮した高速な潮流計算手法が開発されてきている⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。著者らは、これまで、放射状系統用単相潮流計算の各種配電機器モデルを開発してきている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。しかし、これらの配電系統に特化した潮流計算に対して、わが国固有の非接地三相3線式の配電系統における機器を考慮した三相不平衡潮流計算用モデルの開発はほとんどされていない⁽¹³⁾。

本論文では、分散電源が導入された場合の電圧・電流分布を求める配電系統向け高速三相不平衡潮流計算に対して、様々な分散電源、電圧制御機器、負荷等の実用的な配電機

器モデルを開発した。本論文の各種モデルを利用した三相不平衡潮流計算により、分散電源の導入環境における実用的な定常潮流解析が可能となる。開発した各種モデルは、実系統データを利用して有効性を確認した。

2. 配電系統向け三相不平衡高速潮流計算⁽¹⁴⁾

〈2・1〉基本方程式 接地系においては零相インピーダンスを介した回路構成が存在するものの、三相をそれぞれ独立して考える事が出来る。これに対し、非接地系については、二相が決まれば残りの一相は自動的に決まってしまう、各相を独立させて計算を行うことが出来ない。つまり、各状態量のうち、自由に値を変えることが出来るのは二相分のみとなり、非接地の配電系統用のモデルにおいては、全て二相のみの表現に変換しなければならない。以上の事を踏まえ、図1に示す放射状系統の上流(k-1)・下流側(k)の2ノードの物理量の関係を示すと、以下の様になる。

$$V_k = V_{k-1} + Z_k \left(\frac{1}{2} Y_k V_{k-1} - (S_{k-1} / V_{k-1})^* \right) \quad (1)$$

$$S_k = -V_k \times \left(\frac{1}{2} Y_k (V_k + V_{k-1}) - (S_{k-1} / V_{k-1})^* \right) - S_{Lk} \quad (2)$$

$$S_k = \begin{bmatrix} S_{ab} \\ S_{bc} \end{bmatrix}, V_k = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix}, Z_k = \begin{bmatrix} Z_{k11} & Z_{k12} \\ Z_{k21} & Z_{k22} \end{bmatrix}$$

ここで、 V_k : ノード k の電圧、 Z_k : ノード k-1 と k の間の線路インピーダンス、 Y_k : 線路容量、 S_k : ノードから流れ出す線路潮流

なお、(1)(2)式の (S_{k-1} / V_{k-1}) 中のドットは要素毎の計算を行う事を意味する。従って、 (S_{k-1} / V_{k-1}) は要素毎に各々、 S_{ab}/V_{ab} 、 S_{bc}/V_{bc} を計算する事になる。以下、式中に現れるドットは同様に要素毎の計算を意味する。

〈2・2〉潮流方程式 上記の上流と下流ノードの関係より、線路流入電力量を状態変数とする事により、他の状態量は電源側ノードから逐次計算により求められる。樹枝状系統では、フィーダ末端からさらに流出する電力は無いと考えられるため、これが境界条件となり等式制約は以下の様に記述できる。

$$\begin{aligned} S_{00n_{00}} &= S_{00n_{00}}(S_{000}, S_{100}, \dots, S_{1k_1, 0}, |V_{000}|) = 0 \\ S_{ijn_j} &= S_{ijn_j}(S_{ij0}, S_{i+1, 00}, \dots, S_{i+1, k_i, 0}, |V_{000}|) = 0 \\ S_{ijk_j} &= (P_{ijk_j}, Q_{ijk_j}), \\ i &= 0, \dots, l, j = 0, \dots, i_m, k_{ij} = 1, \dots, n_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 l : レベル数、 i_m : レベル i の分岐線数、 n_{ij} : レベル i , 分岐線 j のノード数

図1 簡単な放射状系統

Fig. 1 A simple radial network.

上記(3)式は以下の式にまとめられる。

$$F(S) = 0 \quad (4)$$

〈2・3〉収束アルゴリズム (3)(4)式より、電源から流れる電力及び各分岐線への流出電力を状態変数とした潮流計算を解く事により、高速解法が可能となる。他の変数については、(1)(2)(3)式を用いて電源端から逐次計算すれば良い。つまり、電源から逐次的に各ノードの状態量を計算する前進計算(Forward Sweep)と、末端の電力流出がゼロになるという制約条件から電源から流れる電力及び各分岐線への流出電力(状態変数)を修正する後退計算(Backward Sweep)からなる後退・前進計算(Backward Forward Sweep: 以下、BFS)法により潮流計算が可能である。BFS法は、フィーダから分岐線への流出電力を状態変数とする事により、通常の潮流計算と比較すると、状態変数の減少を実現している。なお、この配電系統向け高速潮流計算は送電系統向け潮流計算として通常利用されているNR法に比較すると配電系統への適用においては実規模系統規模で約8倍高速である事が知られている⁽⁷⁾。BFS法のアルゴリズムを図2に示す。三相不平衡BFS法において、系統の各ノードにおける状態量を計算する段階(前進計算)で、各種配電系統機器の特性を考慮する必要がある。

3. 配電系統モデル

本論文で提案する三相不平衡BFS法で利用する配電系統の各機器モデルの内容を以下に示す。

〈3・1〉等価電源モデル 三相不平衡潮流計算におけるスラック母線は、非接地 6600[V]側から見てスター・デルタ結線の配電用変電所変圧器のさらに上位側のバックインピーダンスを介した母線とし、この母線の電圧(V_{000})は三相平衡とする。なお、この母線電圧は、配電用変電所変圧器のLDC機能を考慮した二次側 6600[V]系統電圧の動きが実際の値とほぼ同じになる様に設定する。

図2 BFS法フローチャート

Fig.2 A flow chart of the backward forward sweep method.

〈3・2〉分散電源モデル

(1) 同期機モデル

① 定力率運転

定力率運転の同期機は、内部インピーダンスを介して端子ノードに接続された△結線の三相平衡電圧源としてモデル化できる。不平衡計算の指定値は、端子ノードから系統に出力する有効無効電力の三相分の総和である。よって、計算では、出力する有効無効電力の三相分総和が指定の値となる様に、同期機の内部誘起電圧が三相平衡であるという条件で収束計算する。なお、定力率運転の同期機は、簡略表現として、PQ指定負荷とし、後述する定電力負荷モデルで負の負荷として取り扱う事も可能である。

② AVR 運転

AVR 運転時は、有効電力出力と端子電圧を指定とする P V 指定ノードとして取り扱う事ができる。P V 指定ノードは、図 3 に示す様に仮想ノードと仮想ブランチを利用して表現する。仮想ブランチは、指定電圧を保持する様に P V 母線に無効電力を供給するために利用する。これにより、P V 母線は計算処理において P Q 母線として扱う事ができ、P V 母線の無効電力指定値は、P V 母線に対する仮想ブランチからの流入無効電力として計算される。仮想的な Q 指定値は P V 指定ノードの電圧と仮想ノードの電圧を用いて、以下の式により求める。

$$Q_{spec} = |V_i'| \left| \frac{V_{fic,i}' - |V_i'|}{X_{fic,i}} \right| \quad (5)$$

$$Q_{spec} = \begin{bmatrix} Q_{ab} \\ Q_{bc} \\ Q_{ca} \end{bmatrix}, \quad V_{fic,i} = \begin{bmatrix} V_{fic,ab} \\ V_{fic,bc} \\ V_{fic,ca} \end{bmatrix}, \quad V_i = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

ここで、 Q_{spec} ：仮想的な Q 指定値、 V_i' ：P V 指定ノード i の反復 t の電圧計算値、 $V_{fic,i}'$ ：P V 指定ノード i の仮想ノードの反復 t における電圧値（ここで、反復とは前進計算・後退計算の 1 回の計算を 1 反復とした場合の各反復をいう。）、 $X_{fic,i}$ ：P V 指定ノード i の仮想ブランチのインピーダンス
ここで、仮想ブランチのインピーダンスは、この方式が収束する様に任意に指定する。仮想ノードの電圧は以下の式により更新する。

$$\begin{aligned} \Delta V_{fic,i}' &= V_i^{Spec} - |V_i'| \\ V_{fic,i}^{t+1} &= V_{fic,i}' + \Delta V_{fic,i}' \end{aligned} \quad (6)$$

図 3 仮想ブランチを利用した P V 指定の取り扱い

Fig.3 A PV node model using a fictitious branch.

$$V_{fic} = \begin{bmatrix} V_{fic,ab} \\ V_{fic,bc} \\ V_{fic,ca} \end{bmatrix}, \quad V_i^{Spec} = \begin{bmatrix} V^{Spec}_{ab} \\ V^{Spec}_{bc} \\ V^{Spec}_{ca} \end{bmatrix}$$

各相毎に計算した P Q 指定値を配電系統用に二相表現として P Q の注入分を計算する。

$$I_G = \begin{bmatrix} -\frac{\bar{S}_{Gca}}{V_{ab} + V_{bc}} - \frac{\bar{S}_{Gab}}{V_{ab}} \\ \frac{\bar{S}_{Gab}}{V_{ab}} - \frac{\bar{S}_{Gbc}}{V_{bc}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\bar{S}_G = V \times I_G^* \quad (8)$$

(2) インバータ型モデル

太陽光発電、あるいは回転機系の同期機や誘導機（風力発電等）が、インバータを通して系統に接続する場合はインバータ型モデルを利用する。電流制御型は、分散電源の出力と系統への注入電流が指定された P I 指定ノードと考えられ、計算されたノード電圧と指定有効電力出力値から指定値に見合う P Q 指定値が計算される。電圧制御型の場合、上述の P V 指定としてモデル化が可能だが、インバータの出力には注入電流に限界があるため上限に達した場合は電流制御型と同様に上限電流が指定値となる。

分散電源の出力 P と系統への注入電流 I が指定された場合の潮流計算の取り扱いには以下の様に考えられる。計算されたノード電圧値と P 値から指定の I に合う Q を計算すると以下の様になる。

$$Q_{spec} = \pm \sqrt{|I|^2 (e^2 + f^2) - P_{spec}^2} \quad (9)$$

$$P_{spec} = \begin{bmatrix} P_{ab} \\ P_{bc} \\ P_{ca} \end{bmatrix}, \quad Q_{spec} = \begin{bmatrix} Q_{ab} \\ Q_{bc} \\ Q_{ca} \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

ここで、 e, f ：計算されたノード電圧ベクトル、 I ：分散電源の出力指定電流、 P_{spec} ：分散電源の有効電力出力指定値、 Q_{spec} ：分散電源の無効電力出力指定値

△回路においては二相表現となるため、各相毎に計算した P Q 指定値を (7) (8) 式で二相表現として P Q の注入分を計算する。ここで、(9) 式は ± の 2 つの解があるが、分散電源の力率の指定よりどちらかの解とする。つまり、計算されたノード電圧、分散電源の出力電流の絶対値及び、分散電源の有効電力出力より無効電力出力を計算し、この値を用いた P Q 指定ノードとして計算を行う。

以上よりインバータ型の分散電源は以下の様に扱う。

① 電圧制御型モデル

- ・ B F S 法潮流計算の前進計算において、有効電力出力指定値 P_{spec} 及び電圧指定値 V を利用した P V 指定により潮流計算を行う。
- ・ P V 指定により求めた Q を用いて発電機の電流出力を計算し、これが電流最大値 I_{max} を越えていなかったら、そのまま下流方向の計算に進む。
- ・ もし、 I_{max} を越えていたら P と I を固定する事になるため、(9) 式で求めた Q_{spec} を用いて P Q 指定値としてそのノードの計算をやり直す。

- ・ P Q指定時に計算されたVを用いて発電機の電流出力を計算し、これが I_{max} 以下になればP V指定に戻し、そのノードの計算をやり直す。

②電流制御型モデル

- ・ B F S法潮流計算の前進計算において、出力指令値P及び電流指令値Iを利用して(9)式で求めた Q_{spec} を用いてP Q指定値としてそのノードの計算を行う。

(3)誘導機モデル 対称座標表現における誘導機モデルは、図4に示す滑りで表現された等価回路で表される。ここで、添字の数字の1は正相を、2は逆相を表す。また、各係数は以下のとおりである。

$Z_s = r_s + jx_s$: 一次インピーダンス

$Z_r = r_r + jx_r$: すべり s の時の二次インピーダンスの一次換算値

$Y_m = jb_m$: 励磁アドミタンス

V : 端子電圧

E : 一次の印加電圧

E_s : 一次の誘起電圧

E_r : 静止時の二次誘起電圧の一次換算値

I : 一次電流

I_r : 二次電流の一次換算値

I_m : 励磁電流

以上より、三相の一次入力の有効電力(P_1)、無効電力(Q_1)、力率(pf_1)を求める。この値が誘導発電機の場合、出力となり、誘導電動機の場合、入力となる。誘導機がすべり s で回転しているとき、二次導体を磁束が切る速さは静止時の s 倍であるので、二次導体に誘起される電圧は sE_{r1} となり同時にその電圧の周波数も sf となるために二次回路のリアクタンスも sx_r となり静止時のリアクタンスの s 倍となる。

以上の事を考慮し、かつ $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = \dot{E}$ において各電流及び電圧の値を求めると、図4の等価回路を考慮する事により次式の関係が得られる。

$$\dot{I}_{r1} = \frac{s\dot{E}_{r1}}{Z_{r1}} = \frac{s\dot{E}_1}{r_r + jsx_r} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\dot{E}_{s1} = \dot{E}_{r1} = \dot{E}_1) \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{m1} + \dot{I}_{r1} = \dot{E}_1 \left(\dot{Y}_m + \frac{s}{Z_{r1}} \right) = \dot{E}_1 \left(-jb_m + \frac{s}{r_r + jsx_r} \right) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_s = \dot{E}_1 \left(1 + Z_s \dot{Y}_m + s \frac{Z_s}{Z_{r1}} \right) \quad (12)$$

式(12)より $\dot{E}$ を求め、式(11)に代入し、整理すると以下の様になる。

$$\dot{I}_1 = \frac{c_1 + jd_1}{a_1 + jb_1} \dot{V}_1 = \frac{(a_1 c_1 + b_1 d_1) + j(a_1 d_1 - b_1 c_1)}{a_1^2 + b_1^2} \dot{V}_1 \quad (13)$$

ここで、

$$a_1 = (r_s + r_s x_s b_m) s + (r_r + x_s r_r b_m) \quad (14)$$

$$b_1 = (x_s + x_s x_s b_m + x_s) s + (-r_s r_r b_m) \quad (15)$$

$$c_1 = (1 + x_s b_m) s \quad (16)$$

$$d_1 = -r_s b_m \quad (17)$$

従って、三相の一次入力の有効電力(P_1)、無効電力(Q_1)、力率(pf_1)は以下の様になる。

$$\begin{aligned} P_1 &= 3 \left[\dot{V}_1 \dot{I}_1 \right]_{real} = 3 \left[\dot{V}_1 \frac{(a_1 c_1 + b_1 d_1) - j(a_1 d_1 - b_1 c_1)}{a_1^2 + b_1^2} \dot{V}_1 \right]_{real} \quad (18) \\ &= 3 \frac{a_1 c_1 + b_1 d_1}{a_1^2 + b_1^2} V_1^2 [W] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= 3 \left[\dot{V}_1 \dot{I}_1 \right]_{imaginary} \\ &= 3 \left[\dot{V}_1 \frac{(a_1 c_1 + b_1 d_1) - j(a_1 d_1 - b_1 c_1)}{a_1^2 + b_1^2} \dot{V}_1 \right]_{imaginary} \\ &= -3 \frac{a_1 d_1 - b_1 c_1}{a_1^2 + b_1^2} V_1^2 [\text{var}] \quad (19) \end{aligned}$$

$$pf_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (20)$$

図4の逆相等価回路についても、正相回路の定式化と同様の手順で逆相の出力について定式化を行うと以下の様になる。ここで、図4に示す様に逆相回路のすべりは $2-s$ で表されるため、逆相回路の定式化においては、正相回路の各式の s を $(2-s)$ に変換したものとなる。

$$\begin{aligned} P_2 &= 3 \left[\dot{V}_2 \dot{I}_2 \right]_{real} \\ &= 3 \left[\dot{V}_2 \frac{(a_2 c_2 + b_2 d_2) - j(a_2 d_2 - b_2 c_2)}{a_2^2 + b_2^2} \dot{V}_2 \right]_{real} \\ &= 3 \frac{a_2 c_2 + b_2 d_2}{a_2^2 + b_2^2} V_2^2 [W] \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= 3 \left[\dot{V}_2 \dot{I}_2 \right]_{imaginary} \\ &= 3 \left[\dot{V}_2 \frac{(a_2 c_2 + b_2 d_2) - j(a_2 d_2 - b_2 c_2)}{a_2^2 + b_2^2} \dot{V}_2 \right]_{imaginary} \\ &= -3 \frac{a_2 d_2 - b_2 c_2}{a_2^2 + b_2^2} V_2^2 [\text{var}] \quad (22) \end{aligned}$$

誘導機の三相出力は、(18)(19)式で表される正相出力と、

図4 誘導機等価回路

Fig.4 An equivalent circuit for induction generator.

(21) (22) 式の逆相出力を足した値となるため下式で表される。

$$P_{total} = P_1 + P_2 = f(V_1, s) + f(V_2, s) = f(V_1, V_2, s) \quad (23)$$

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 = f(V_1, s) + f(V_2, s) = f(V_1, V_2, s) \quad (24)$$

P_{total} が指定値になる s を NR 法等の収束計算で求める。

〈3・3〉電圧制御機器モデル

(1) 配電用変電所変圧器モデル 配電用変電所に設置される配電用変圧器は、配電用変圧器より上位の変圧器の一次側で接地されている接地系であるため、接地 Y-Δ 変圧器としてモデル化が可能であり、以下のアドミタンス行列で表される⁽¹⁴⁾。

$$Y_{pp} = \frac{y_l}{\alpha^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Y_{ps} = -\frac{y_l}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$Y_{sp} = -\frac{y_l}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad Y_{ss} = \frac{y_l}{\beta^2} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 y_l ：変圧器漏れアドミタンス、 α ：一次側タップ比(1.0 固定)、 β ：二次側タップ比

また、配電用変電所変圧器は、LDC 機能を用いて系統内の一定点の電圧を一定にするため、負荷比率に応じて適切なタップ値に保つ様な制御を実施している。この様な機器は、以下の計算式により、送出電圧から一定点までの線路電圧降下を考慮した電圧計算値(E_{0calc})と基準電圧(E_0)との差が不感帯以上ずれた場合、タップを制御するモデルとなる。

$$E_{0calc} = |\dot{E}_{ac} - \dot{I}_{ac} \cdot \dot{Z}_c| \quad (26)$$

ここで、 E_{0calc} ：電圧調整器基準電圧(一次側)、 $\dot{E}_{ac}$ ：二次側電圧(A C 相線間電圧)、 $\dot{I}_{ac}$ ：二次側電流(A 相線路電流 - C 相線路電流、 $\dot{I}_{ac} = \dot{I}_a - \dot{I}_c$)、 $\dot{Z}_c$ ：電圧一定点までの等価インピーダンス(整定値)

(2) SVR モデル 各フィーダに必要なに応じて設置される SVR は、単巻 V 結線が多く用いられているが、Δ-Δ 結線の変圧器で模擬する事が可能である。Δ-Δ 結線の変圧器は、以下のアドミタンス行列で表される⁽¹⁴⁾。

$$Y_{pp} = \frac{y_l}{\alpha^2} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad Y_{ps} = -\frac{y_l}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$Y_{sp} = -\frac{y_l}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad Y_{ss} = \frac{y_l}{\beta^2} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 y_l ：変圧器漏れアドミタンス、 α ：一次側タップ比(1.0 固定)、 β ：二次側タップ比

SVR は、上述の配電用変圧器と同様に、LDC 機能を有しており、系統内の一定点の電圧を一定にする様な制御を実施している。また、逆潮流時にはタップがロックされる場合(素通し)と、逆潮流対応としロックされないモデルの両方を考慮する。SVR モデルのフローを図 5 に示す。

(3) パワエレ型の制御機器モデル 配電系統への適用を検討するパワエレ機器モデルとして、以下の 4 つのモデルを考える。

①直列形補償装置

直列形補償装置は、一次側電圧を入力して二次側電圧目標値との差 ΔV を計算し、二次側電圧を連続的に制御する事が可能である。SVR は、タップによる離散制御となるが、このタップが連続量となったものと概念的には等価である。

直列形補償装置モデルは図 6 に示す様に、可変インピーダンスを用いて二次側電圧を連続的に制御する事によりモデル化する事ができる。機器のインピーダンスは無視できるほど小さいため、一次側と二次側での電圧位相差はほとんど現れず、電圧の大きさのみの補償となる。配電系統用のモデルは全て二相のみの表現であり、三相全てを制御する事は出来ない。そこで、代表相から各相の補償量を求め、電圧位相が変化しない様な処理をする必要がある。なお、直列形補償装置では、機器への注入・流出の有効電力は変わらないという事から、供給(消費)する同量の有効電力を吸収(注入)する必要がある。つまり、無効電力を供給・吸収する事で電圧を補償する事になる。モデル化においては、代表相(以下、例として AB 相)の電圧 V_{ab1} と電圧指令値 V_{2ref} から電圧補償量を計算する。なお、この時の ΔV_{ab2} が制御幅 V_{limit} を超えていたら、 ΔV_{ab2} を V_{limit} にする。

$$\Delta V_{ab2} = V_{2ref} - V_{ab1} \quad (28)$$

求めた補償量 ΔV_{ab2} から BC 相の補償量 ΔV_{bc2} を計算する。このとき、一次側の AB 相、BC 相の電圧から電圧比を求め、補償量 ΔV_{bc2} を求める。

$$V_{rat} = V_{bc1} / V_{ab1} \quad (29)$$

$$\Delta V_{bc2} = \Delta V_{ab2} \times V_{rat} \quad (30)$$

また、 ΔV_{ca2} は以下に示す様に、 ΔV_{ab2} と ΔV_{bc2} から求める。

$$\Delta V_{ca2} = -(\Delta V_{ab2} + \Delta V_{bc2}) \quad (31)$$

求めた補償量と電流値から可変インピーダンス $Z (= r + jx)$ を計算する。

$$Z = r + jx = \Delta V_2 / I_1 \quad (32)$$

図 5 高速潮流計算に組み込む SVR モデルのフロー

Fig. 5 A general flow chart of a SVR model.

$$V = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

この際、有効電力の変化分は以下の式より求まる。

$$P_{series} = r|I|^2 \quad (33)$$

$$(\because P_{series} + jQ_{series} = \Delta V_2 \times I^*)$$

つまり、この P_{series} と同量の有効電力を系統から吸収(注入)し、供給(消費)する事で、有効電力の授受の総和を 0 にする。また、有効電力潮流を示すと以下の様になる。なお、系統に注入(供給)する方向を正としている。

$$P_1 - P_{inj} + P_{series} = P_2$$

$$(\because |P_{inj}| = |P_{series}|) \quad (34)$$

$$\therefore P_2 = P_1$$

②並列形補償装置

並列形補償装置は、他励式及び自励式の SVC (Static Var Compensator) 等であるが、SVC の設置ノードの背後に仮想の PV 指定ノードを設置し、仮想ノードと SVC 設置ノードの間の仮想ブランチインピーダンスをスロープとする事によりモデル化する事ができる⁽¹⁵⁾。従って、図 7 に示す様なモデルとなる。ここで、PV 指定ノードは、図 3 に示す様に背後に仮想ノードが必要である。従って、実際には、図 7 の左の PV 指定ノードのさらに左側に仮想ノードが必要となる。この際、無効電力制限値を考慮し、制限値に達した場合は PQ 指定値に変更する。このモデルにおいては、制限範囲内であれば PV 指定 (Q のみで補償するため P は零) ノードとなるため以下の式で表される。

$$Q_{spec} = |V| \left(\frac{V_{fic}^1 - |V|^1}{X_s} \right) \quad (35)$$

$$Q_{spec} = \begin{bmatrix} Q_{ab} \\ Q_{bc} \\ Q_{ca} \end{bmatrix}, \quad V_{fic} = \begin{bmatrix} V_{fic_ab} \\ V_{fic_bc} \\ V_{fic_ca} \end{bmatrix}, \quad V^1 = \begin{bmatrix} V_{ab}^1 \\ V_{bc}^1 \\ V_{ca}^1 \end{bmatrix}$$

仮想ノードからの注入電力により PV ノードの電圧 (V^2) が変化するので、下式を用いて仮想ノードの電圧値を更新して収束計算の反復を終了する。

$$\Delta V_{fic}^1 = V_{spec}^1 - |V|^2 \quad (36)$$

$$V_{fic}^2 = V_{fic}^1 + \Delta V_{fic}^1$$

$$V_{fic} = \begin{bmatrix} V_{fic_ab} \\ V_{fic_bc} \\ V_{fic_ca} \end{bmatrix}, \quad V_{spec} = \begin{bmatrix} V_{spec_ab} \\ V_{spec_bc} \\ V_{spec_ca} \end{bmatrix}$$

無効電力出力が制限値を超えた場合は、 $P = 0$ 、 $Q =$ 制限値

図 6 直列形補償装置モデル
Fig.6 A series compensation model.

で固定された PQ 指定ノードとして扱う。

上記の計算によって求めた無効電力値を、PV 指定ノードと同様に、配電系統用の二相表現に変換する必要がある。

$$\bar{S}_G = V \times I_G^* \quad (37)$$

$$I_G = \begin{bmatrix} -\frac{\bar{S}_{Gca}}{V_{ab} + V_{bc}} - \frac{\bar{S}_{Gab}}{V_{ab}} \\ \frac{\bar{S}_{Gab}}{V_{ab}} - \frac{\bar{S}_{Gbc}}{V_{bc}} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} \quad (39)$$

③直並列形補償装置

直列及び並列形補償装置を混合した装置であり、二次側電圧を連続的に制御するとともに、連続的に無効電力を系統に注入する事が可能である。例えば、UPFC (Unified Power Flow Controller) 等がこの様な装置となる。直並列形補償装置は図 8 に示す様に、可変インピーダンスで構成される直列補償部と、無効電力で電圧補償を行う並列補償部の組み合わせであり、直列、並列部でそれぞれ個別の指令値で制御を行う。

④位相調整パワエレ機器

位相調整パワエレ機器は、通常の移相変圧器と同様に電圧の絶対値のみではなく、位相をも調整する機器である。機器の一次側電圧 V_1 は計算により求まっており、二次側電圧 V_2 は規定値としてわかっている。つまり、一、二次側電圧とも明確となっている。従って、図 9 に示す様に、一次側と二次側電圧から電圧修正量 V_{12} が求まり、この方向に電圧を修正する事となる。また、一般的に変圧器は系統容量に対してはかなり小さいため、ロスを見捨てる。つまり、機器を通して電力は変化が無いと仮定できる。ただし、上述の直列形補償装置と同様に、配電系統においては二相のみの表現であり、三相全てを制御する事は出来ないため、二相の位相調整のみを行う事になる。上記を踏まえモデル化は以下の様に行う。

まず、一次側電圧 V_1 と二次側電圧指令値 V_{2ref} から修正量 ΔV を求める。

$$\Delta V = V_{2ref} - V_1 \quad (40)$$

ΔV が電圧調整最大値 ΔV_{max} を超えた場合は以下の式により ΔV を修正する。

$$\Delta V = \Delta V \times |\Delta V_{max}| / |\Delta V| \quad (41)$$

求めた修正量、一次側電圧から二次側電圧を計算する。

$$V_2 = V_1 + \Delta V \quad (42)$$

<3.4>配電線及び負荷モデル

図 7 並列形補償装置モデル

Fig.7 A parallel compensation model.

(1) 配電線モデル 配電線モデルは三相 3 線から自己及び相互インピーダンスからなる 3×3 のインピーダンス行列を作成する。しかし、 Δ 回路においては上述の様に自由度 2 の 2×2 のインピーダンス行列としなければならない。そのため、まず 3×3 のインピーダンス行列を作成し、下式を用いて 2×2 の行列を作成する⁽¹⁴⁾。

$$Z_{line} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \cdot Z_{phase} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

ここで、 Z_{line} : 2×2 表現のインピーダンス行列、 Z_{phase} : 3×3 表現のインピーダンス行列

(2) 負荷モデル

Δ 負荷モデルは、定インピーダンス、定電流、定電力とその混合となる一般的な Z I P 負荷として表現する⁽¹⁴⁾。

① 定電力負荷

定電力負荷は、 $S_L(P_L + jQ_L)$ を固定値として与えるものであり、下式で負荷電流を求めた後、(45) 式で負荷電力を計算する。

$$I_L = \begin{bmatrix} -\frac{\bar{S}_{Lca}}{V_{ab} + V_{bc}} - \frac{\bar{S}_{Lab}}{V_{ab}} \\ \frac{\bar{S}_{Lab}}{V_{ab}} - \frac{\bar{S}_{Lbc}}{V_{bc}} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\bar{S}_L = V_L \times I_L^* \quad (45)$$

$$S_L = \begin{bmatrix} S_{Lab} \\ S_{Lbc} \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} \quad (46)$$

② 定電流負荷

定電流負荷は、 $I_L(a_L + jb_L)$ を固定値として与えるものであり、下式で負荷電流を求めた後、(45) 式で負荷電力を計算する。

図 8 直並列形補償装置モデル

Fig.8 A series parallel compensation model.

図 9 位相調整パワエレ機器モデル

Fig.9 A phase shifter model.

$$I_L = \begin{bmatrix} \bar{I}_{Lca} - \bar{I}_{Lab} \\ \bar{I}_{Lab} - \bar{I}_{Lbc} \end{bmatrix} \quad (47)$$

③ 定インピーダンス負荷

定インピーダンス負荷は、 $Z_L(r_L + jx_L)$ を固定値として与えるものである。計算ではアドミタンスとして扱い、下式で負荷電流を求めた後、(45) 式で負荷電力を計算する。

$$I_L = - \begin{bmatrix} \bar{y}_{Lca} + \bar{y}_{Lab} & \bar{y}_{Lca} \\ -\bar{y}_{Lab} & \bar{y}_{Lbc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} \quad (48)$$

④ Z I P 混合負荷

Z I P 混合負荷においては、上記の三種類の負荷の割合を入力し各反復において計算によって得られたノード電圧を用いて、以下の式により指定値を計算し直す。

$$S_{spec} = w_p \times \bar{S}_k + w_i \times V_k \times (\bar{I}_k)^* + w_z \times V_k \times \left(\frac{V_k}{Z_k} \right) \quad (49)$$

$$w_p + w_i + w_z = 1.0$$

ここで、 w_p : 定電力負荷の割合、 w_i : 定電流負荷の割合、 w_z : 定インピーダンス負荷の割合、 V_k : 計算されたノード k の電圧値

4. 計算例

<4.1> 計算条件 各モデルは、実システムの三相不平衡実測データ、EMTP、別途開発している単相潮流計算モデル⁽¹²⁾などを利用した検証より動作の有効性を確認している。ここでは、紙面の都合上、以下について計算例を示す。

(ケース 1) 実システムの三相不平衡実測データを用いた検証

実測データを用いたシミュレーションにより、配電用変圧器、配電線、負荷、同期機モデルの動作の検証を行う。

(ケース 2) 同期機モデルと誘導機モデルの検証

各機器の特性による配電システムへの影響をシミュレーションにより比較を行い、実際の機器特性が実現できているか検証を行う。

以下、各々のケースについて条件を示す。

(1) ケース 1

図 10 に実システムを元に作成したシステムモデルを示す。対象システムは系統変圧器容量 10 [MVA] である。システム条件を以下に挙げる。なお、ここでは実測値と良く一致した結果が得られる事を確認している Zbus-Gauss (以下、ZG) 法三相不平衡潮流計算⁽¹⁶⁾との比較を行う。

① 配電線及び互長

配電線互長は約 10 [km] である。配電線は (43) 式から線路インピーダンスの三相不平衡を取り扱う事が可能であるが、微小な値となるため、ここでは完全三相平衡とし、相互結合は無いものとした。なお、文献 (16) では、完全三相平衡な配電線を利用して実測値と計算値を比較し、両者が一致したことを検証している。

② 負荷

不平衡の実測負荷であり、総負荷は約 1100 [kVA] である。

③ 分散電源

分散電源は同期機とし、容量は 130 [kVA] とした。

(2) ケース 2

図 1 1 に対象モデル系統を示す。系統条件を以下に挙げる。

①配電線及び亘長

配電線亘長は約 5.25[km]であり、配電用変電所から 1.1[km]の地点に SVR が設置されている。配電線は完全三相平衡とし、相互結合は無いものとした。SVR 整定値は、分散電源が無い状態でノード 8 を電圧を 6600[V] で一定になる様にした値である $4.2+j2.0[\%]$ を用いた。

②負荷

不平衡負荷であり、総負荷は約 2100[kVA]である。

③分散電源

分散電源は、同期機と誘導機を考慮し、それぞれの三相有効電力出力を 500[kW]とした。

＜4・2＞シミュレーション結果

(1) ケース 1

シミュレーション結果の電圧プロフィールを図 1 2 に示す。図では各相毎に 1 つのグラフとなっているが、これは ZG 法の結果とシミュレーション結果が完全に一致しているためである。従って、開発したモデルが、実際の系統における機器を模擬したモデルとして高精度であると言える。また、計算結果と実測値が一致していることから、ここで扱っている三相不平衡潮流計算は線路インピーダンスの不平衡性まで考慮する事は可能であるが、文献(16)に示されているように、この不平衡性の考慮までは必要ないということがわかる。

(2) ケース 2

シミュレーション結果の電圧プロフィールを、同期機を図 1 3 に、誘導機を図 1 4 に示す。結果から以下の事が言える。

①同期機と比べ誘導機のほうが電圧が下がっており、系統側から見ると無効電力を消費するという誘導機の特徴がみられる。

②誘導機の方が電圧が落ちるため、配電用変圧器及び、SVR のタップが多く動いている。

③SVR 整定値が示す目標地点(ノード 8)は、同期機ではほぼノード 8 となっているのに対し、誘導機ではノード 8 にはなっていない。これは、分散電源を連系しない状態で求めた整定値が、 $4.2+j2.0[\%]$ と R 分の方が多いためで

あり、無効電力を消費する誘導機を連系する事により無効電力が多く流れ、実際の電圧降下と SVR の LDC の計算で求めた電圧降下分に誤差が生じたためである。

以上より、複数の機器モデルを用いたときの各機器毎への影響をシミュレーションにより検証し、動作の妥当性を確認した。また同期機、誘導機モデルともに逆相回路の計算を行うため、回転機の逆相耐量などの計算も可能である。

5. まとめ

本論文では、配電系統に対して分散電源が導入された場合に電圧・電流分布を求める三相不平衡 B F S 法に用いる実用的な配電系統モデルについて述べた。具体的には以下の機器のモデル化を行った。

(1) 分散電源モデル

- ・同期機 ・誘導機
- ・インバータ型(電圧制御型、電流制御型)分散電源

(2) 電圧制御機器

- ・配電用変圧器 ・SVR ・直列形補償装置
- ・並列形補償装置 ・直並列形補償装置
- ・位相調整パワエレ機器

(3) 配電線

- ・相互結合を考慮した三相不平衡配電線

(4) 負荷

- ・Z I P 型(定インピーダンス、定電流、定電力とその混合)三相不平衡負荷

また、実測値との比較検証、分散電源種類による電圧プロフィールの差異、各種機器への影響等をシミュレーションにより検証し、本モデルの有効性を確認した。

今後は、今回開発した配電系統向けの実用的なモデルを用いた高速潮流計算を活用して、分散電源が連系される事

図 1 1 配電系統モデル(ケース 2)

Fig.11 A distribution model (case2).

図 1 0 配電系統モデル(ケース 1)

Fig.10 A distribution model (case1).

図 1 2 電圧プロフィール(ケース 1)

Fig.12 Voltage profile (case1).

図 13 同期機の電圧プロフィール(ケース 2)

Fig.13 Voltage profile by synchronous generator (case2).

図 14 誘導機の電圧プロフィール(ケース 2)

Fig.14 Voltage profile by induction generator (case2).

により求められる制御機能の高度化に向けて検討していく予定である。また、配電系統計画用ツールの定常解析機能の1つとして、分散電源導入時の解析を総合的に行う事ができる解析ツールについても検討していく予定である。

(平成 13 年 6 月 1 日受付, 平成 13 年 9 月 27 日再受付)

参考文献

- (1) 仲・元治・由良・林・高山・徳田・福山:「分散電源の連系を考慮したSVRとUPFCの協調制御方式の検討」電気学会全国大会 No.6-176 平成 13 年 3 月
- (2) 関根:電力系統解析理論 電気書院 昭和 46 年 1 月
- (3) M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.735-742, January 1989.
- (4) H. D. Chiang, "A Decoupled Load Flow Method for Distribution Power Networks: Algorithms, Analysis and Convergence Study", Electrical Power & Energy Systems, Vol.13, No.3, pp.130-138, June 1991.
- (5) T. H. Chen, M. S. Chen, et al., "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.6, No.3, pp.1146-1152, July 1991.
- (6) C. S. Cheng and D. Shomohammadi, "A Three-Phase Power Flow Method for Real-time Distribution System Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.2, pp.671-679, May 1995.
- (7) R. Zimmerman and H. D. Chiang, "Fast Decoupled Power

Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.4, pp.2045-2052, November 1995.

- (8) 福山・中西:「並列処理を用いた放射状系統高速潮流計算」電気学会論文誌 B 116 巻 1 号 平成 8 年 1 月
- (9) 福山・中西:「三相不平衡潮流解析技術」富士時報 第 69 巻 3 号 平成 8 年 3 月
- (10) 福山・渡辺・中西:「放射状系統向け高速三相不平衡潮流計算プログラムの開発」電気学会全国大会 No.1317 平成 10 年 3 月
- (11) 福山・中西:「配電系統向け高速潮流計算用電圧自動調整器モデル」電気学会論文誌 B 研究開発レター 平成 10 年 6 月
- (12) 藤根・元治・由良・福山・渡辺・中西:「分散電源の連系を考慮した配電系統潮流計算用機器モデルの開発」電気学会電力技術研究会 PE-99-111 平成 12 年 8 月
- (13) 大森・元治・由良・渡辺・高山・福山:「配電系統の三相不平衡潮流計算用配電機器モデルの基礎検討」電気学会全国大会 No.6-131 平成 13 年 3 月
- (14) R. Zimmerman, Ph.D. Thesis, Cornell University, January 1995.
- (15) CIGRE SC38 TF 38-01-08, *Modelling of Power Electronics Equipment (FACTS) in Loadflow and Stability Programs*, CIGRE, September 1998 Draft Report.
- (16) 清水・藤根・元治・由良・藤田・中西:「配電系統に連系される発電機起動停止時の実測と解析 —その 2—」電気学会全国大会 No.6-116 平成 12 年 3 月

大森 俊也

(正員) 1964 年 2 月 8 日生まれ。1986 年 3 月京都大学電気工学第 2 学科修了。同年関西電力(株)入社。1999 年から同社総合技術研究所勤務。主として、分散電源の連系に関する研究に従事。現在、電力技術研究所流通設備研究室副主任研究員。

元治 崇

(正員) 1951 年 1 月 30 日生まれ。1975 年 3 月岡山大学大学院工学研究科修了。同年関西電力(株)入社。1985 年から同社総合技術研究所勤務。主として、配電線雷害対策、配電自動化、分散電源の連系に関する研究に従事。現在、電力技術研究所流通設備研究室主席研究員。

由良 俊樹

(正員) 1955 年 3 月 5 日生まれ。1977 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。同年関西電力(株)入社。1999 年から同社総合技術研究所勤務。主として、配電関係の研究に従事。現在、電力技術研究所流通設備研究室主幹。

渡辺 拓也

(正員) 1974 年 5 月 31 日生まれ。1993 年 3 月沼津工業高等学校電子科卒業。同年 4 月富士電機(株)入社。主として、配電系統における潮流計算技術に関する研究に従事。

高山 信一

(正員) 1973 年 11 月 14 日生まれ。1998 年 3 月法政大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月富士電機(株)入社。主として、電力系統への最適化手法の適用に関する研究に従事。

福山 良和

(正員) 1962 年 7 月 26 日生まれ。1987 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月富士電機(株)入社。1993~94 年米国コーネル大学客員研究員。主として、電力系統のインテリジェントシステム適用, 制御および系統解析に関する研究に従事。工学博士。IEEE 会員。