

配電線系統の電圧解析手法

Voltage Analysis Method for Distribution Power Network

佐藤 徹^{※1}
Toru Satoh
神部 晃^{※2}
Akira Kambe
川口 洋史^{※3}
Hiroshi Kawaguchi

1 はじめに

我が国の電力系統は、送電系と配電系の2系統に大別できる。送電系は、一般的に発電/変電/送電線系統を包含した呼称であるが、系統解析の場合は、通常、特高系(66kV以上)の送電線が対象である。配電系は高圧系(6kV系)と低圧系に大別されるが、解析は主に高圧配電線を対象に行う場合が多い。

従来から送電系の解析は、電力潮流計算や安定度解析など広く深く研究されており、更に近年の計算機の進歩に伴って、より高速かつ精密な解析が可能となっている。これらの送電系の解析手法については、優れた教科書も書かれており⁽¹⁾⁽²⁾、電力系統工学の一つの重要な分野が形成されている。

一方、配電系については、送電系のような統一的な解析研究が行われていないのが実情である。配電系統は、網目のように面的に広がっており、電力供給先の負荷も多種類におよび、送電系統とは系統状態が大きく異なっている。また、管理面においても、配電系はユーザーに直結されており、ユーザーへのサービスを主眼に置いた管理となる。解析目的も、主に配電線の電圧管理であり、このための電圧解析は、簡易的な回路計算で済みます場合が多くあった。

しかし、近年、分散電源の導入が開始され、熱併給発電(Co-generation)や太陽光発電(Photovoltaic generation)などが、配電系統に連系されるようになった。このような新しい電源と、従来からの電圧調整器(SVR)や無効電力調整器(SVC)などの電圧調整装置との制御・動作連携や電圧管理などが新しい問題としてクローズアップされてきてい

る。

この新しい問題のための電圧解析手法も近年研究されはじめ、配電系統用の手法として発表されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、これらの手法も送電系の潮流計算と基本的には同一手法であり、もう少し配電系に特化した簡便な手法が望まれている。

筆者らは、従来からの潮流計算手法と簡易回路計算手法との中間的位置づけの方法を用いて、配電線系統の電圧解析計算や系統の電圧調整シミュレーションなどを行っている。この解析計算ソフトウェアを、研究や製品開発のための有効なツールとして利用している。

本稿では、前半でその計算手法を平易に解説し、後半で本計算を利用した配電線系統の電圧調整シミュレーションについて紹介する。

2 配電線系統

2.1 配電線系統の設備形態

(1) 系統形態

配電線には、6.6kV系の高圧配電線と100/200/400V系の低圧配電線とがあるが、今回の対象は高圧配電線(以下、単に配電線という)である。図1に配電線系統のイメージ図を示す。

配電線の電力供給形態は、送電系の複数電源/ループ送電とは対照的に、単一電源から負荷に対して樹枝状/放射状に広がった形態である。

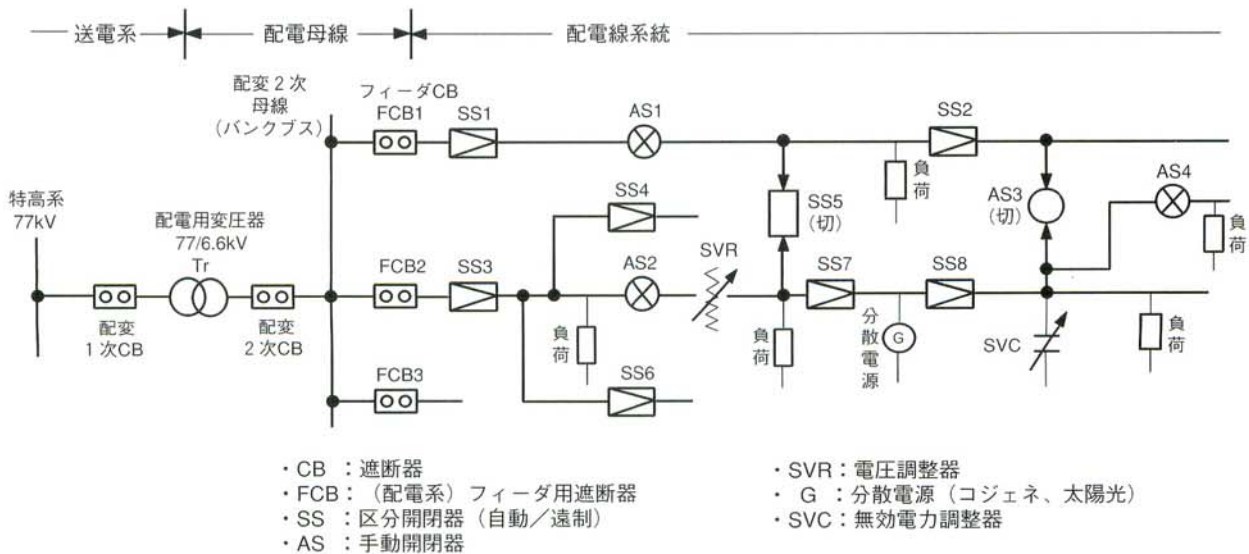


図1 配電線系統のイメージ図

※1 電力事業部 配電自動化開発室
※2 機器開発事業部 システム開発部

※3 アイチ-エマソン電機 技術本部

ただし、配電線の設備工事時に停電を防止するためのループ送電が行われる事があるが、定常的にループ状態が保たれることはない。

(2) 系統の分割単位

配電線系統は、大きくは、故障時の時限投入区間(以下SS区間)により4～8区間程度に分割されている。その区間は更に手動開閉器(AS)により数分割されている(以下AS区間)。

工事等で系統切替がおこなわれる場合に、基本となる切替単位はAS区間である。配電線の電圧解析においても、このSS区間/AS区間で系統を適宜分割して、その区間に負荷を集約することがよく行われる。

(3) 需要家設備(負荷/分散電源)

負荷には、高圧配電線から需要家が直接受電する高圧負荷と、柱上変圧器で低圧に降圧して受電する低圧負荷との2種類がある。配電線系統の解析では、高圧系を直接的な対象としている。したがって、通常、低圧負荷は高圧側に変換して解析し、結果の低圧側への換算は、必要に応じてその都度行う。

配電系で扱う負荷の種類・性質は千差万別で、個別的取扱いは困難であり、前述のように、ある単位(AS区間など)で集約した平均的な負荷として扱うことが多い。

旧来の系統では需要家設備として負荷(=電力を消費する)を扱うのみであったが、近年は分散電源(=電力を発生する)をも扱う事が必要になってきた。

(4) 電圧調整装置

配電線の送り出し電圧は、変電所に設置された配電用変圧器(以下、配変)により調整される。一般に配変には負荷時タップ切換変圧器(LRT)が用いられ、適正な電圧に自動調整されている。

しかし、配電線系統が長くなると、配電線による電圧降下を補償するため、系統の途中で電圧調整器(SVR)を設置することが行われる。また、配電線の末端部に無効電力調整器(SVC)を設置し、電圧調整を行うことも試みられている⁽⁶⁾。

2.2 電圧解析の目的と対象要素

(1) 解析の目的

送電系の解析の目的が、多数の発電所が連系された大規模系統の電力潮流の管理・制御や系統の安定度確保であることに對して、配電系では、配電線系統の需要家端での電圧管理・制御が主目的である。

電圧の管理目標値は、低圧100V系で $101 \pm 6V$ と決められており、 $\pm 6\%$ 以内への電圧調整・管理が要求されている。電源の取扱いについても、配電系では、電源を無限大母線の単一電源として配電線系統の解析を行う。

このように、解析目的は、送電系とは大きく相異している。

(2) 対象要素

前出図1の系統や設備が解析対象となるが、もう少し整理すると次のようになる。

① 電源

配変を無限大母線とみなす。配変はLRTであるので、電圧は定電圧制御される。このため、定電圧源として解析ができる。

② 系統

基本的にフィーダ単位(一つのFCBから給電される系統)の解析となる。ループ系統については後述する。

③ 直列設備

配電線に直列に挿入されている設備であり、解析対象は、配電線路(電線)とSVRである。開閉器類(FCB/SS/AS)は、線路の区間分割に考慮されるのみで、直接的に解析計算されることはない。SVRは電圧調整継電器(90リレー)により、自動的にタップ切換が行われる。このため、電圧調整の挙動も含めて系統を解析する場合は90リレーとSVRの動作シミュレーションが必要となる。

④ 並列設備

基本的には、一般需要家の負荷が並列設備となる。これとは別に、進相コンデンサ(SC)やSVCは特殊負荷としての解析が必要である。SVCは上記SVRと同様に自動調節機能があるので、場合によってはシミュレーションが必要となる。

これらの負荷とは全く異なった設備として、近年導入されてきた分散電源がある。この分散電源は従来の負荷と性質が大きく異なるため、扱いに注意が必要となる。

(3) 系統の運用形態

① 標準系統

定常的に運用されている系統形態である。供給主電源は単一電源であり、分散電源は主電源とはしない。また、ループ送電はされていない。

系統が標準系統状態であれば、解析で扱う系統は単一フィーダ系統で済む。

② 非標準系統

配電線工事のために、停電区間があったり、ループ送電されていたりする一時的な系統の状態のことである。

ループ送電時以外は標準系統と同じく単一フィーダを対象とすれば良いが、ループ送電時の扱いは注意が必要である。

・同系統ループ

上位系統や配電母線(バンク)が同一の電源から電源供給を受けて、フィーダ側でループ送電をしている場合である。例えば、図1の連係開閉器(SS5, AS3)を投入した場合などがこのループ送電である。

このような場合には、上位電源を単一電源として、ループとなっている2フィーダを一括して解析することになる。

・異系統ループ

上位系統の異なる電源によるループ送電であるが、通常は殆ど実行されないため解析対象とする必要はまず無い。

3 系統電圧計算

3.1 計算手法概要

一般の潮流計算では、ノード方程式を基本にして、各ノードの有効電力Pと無効電力Qを指定するP-Q指定ノード条件を与えて収束計算を行う手法が採られている。前述の配電線系統を対象とした解析も、このP-Q指定の手法で行われている。これらの計算は、ほとんど全てのノードについて収束計算が必要となるため、初学者にとっては取扱いが不便であったり、収束計算に多くの時間を要したりするという問題があった。

本稿で紹介する手法は、そのノード方程式を用いることは同様であるが、電力系統を直列設備(線路, SVR)と並列設備に明確に分離して扱い、さらに並列設備である一般負荷や特殊負荷(進相コンデンサ, SVC), 分散電源(コジェネ, 太陽光)を統一したインピーダンス(およびその逆数のアドミタンス)表現として扱うことにより、収束計算を最少限にして取扱いを容易にし、さらに計算の高速化も図ったものである。

また、SVRやSVCを導入して、それらの系統計算と電圧調整動作シミュレーションとを連携した、配電線系統の動的電圧解析を可能にもしている。

3.2 ノード方程式

ノード方程式についてはよく知られているが、本手法では若干アレンジして用いるので、復習の意味を含めて平易に解説しておく。

(1) 線路インピーダンスのアドミタンス表現

配電線路は線路インピーダンスネットワークである。ネットワーク表現にはインピーダンス表現と、アドミタンス表現の2種類あるが、通常はアドミタンス表現の方が用いられる。

(2) 基本回路

計算対象となる基本回路を図2に示す。図中のNが配電系統の直列設備(ここでは線路)のネットワークである。

配電の送り出し電源を0番ノードに指定している。それ以外については、ノード番号は自由である。配電線系統は、この一般化した回路で扱うことができる。

なお、電流の極性は一般の教科書とは逆にしている。これは、配電系では電源ノードより負荷ノードの方が圧倒的に多いことから、負荷を基準に電流方向を決めたためである。

(3) 線路アドミタンス行列

図2の線路ネットワークNをアドミタンス行列Yで表現すると(1)式になる。

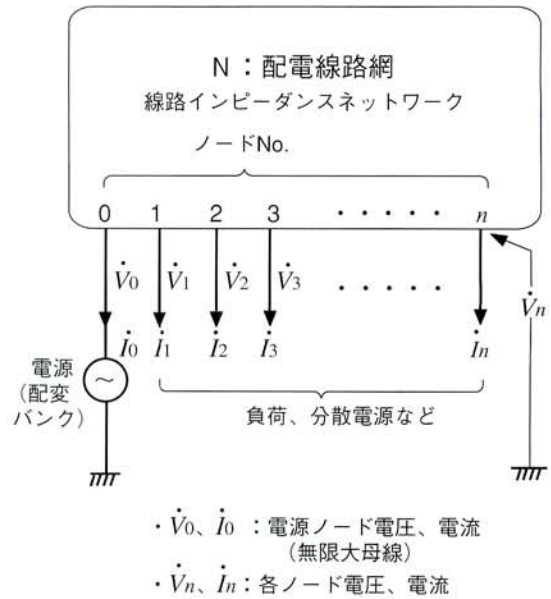


図2 配電線路網の基本回路図

$$Y = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{00} & \dot{Y}_{01} & \cdots & \dot{Y}_{0n} \\ \dot{Y}_{10} & \dot{Y}_{11} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{n0} & \cdots & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

このYを線路アドミタンス行列と呼ぶことにする。Yの各要素アドミタンスの定義は下記の通りである。

① \dot{Y}_{kk} : k番ノードの自己アドミタンス(駆動点アドミタンスとも言う)

k番ノード以外のすべてのノードを接地して、kから見たアドミタンスに負符号をつけたもの。すなわち、他のノード電圧を0として、k番ノードに単位電圧(1+j0)を印加した時に、流れ込む電流値に負符号をつけたもの。更に言い換えると、k番ノードに接続された線路アドミタンスの総和である。

② \dot{Y}_{jk} : j-k間相互アドミタンス(伝達アドミタンスとも言う)

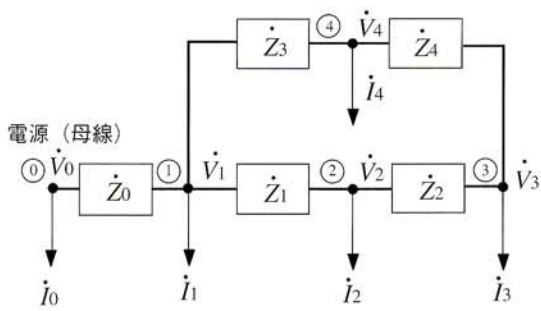
k番ノードとj番ノード間に直接接続されているアドミタンス。すなわち、k番ノード以外のすべてのノードを接地して、k番ノードに単位電圧を印加した時に、j番ノードに流れ出る電流値である。

一般に $\dot{Y}_{jk} = \dot{Y}_{kj}$ であり、Yは対称行列となる。

③ Yの例

上記①②の定義に基づいてYを作成した例を図3に示す。これは、0番ノードを電源ポイント(FCB)にし、③番ノードで自回線ループを形成している配電線系統に相当する。

このようにノード番号をつければ、あとは機械的にYを作成することができる。



(a) 線路インピーダンスネットワーク

$$Y = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z_0} & \frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_3} & \frac{1}{Z_1} & 0 & \frac{1}{Z_3} \\ 0 & \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} & \frac{1}{Z_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} & -\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_4} & \frac{1}{Z_4} \\ 0 & \frac{1}{Z_3} & 0 & \frac{1}{Z_4} & -\frac{1}{Z_3} - \frac{1}{Z_4} \end{bmatrix}$$

(対称)

(b) 線路アドミタンス行列

図3 線路アドミタンス行列の例

(4) ノード方程式

図2の基本回路にて、ノード電流ベクトルを*i*、ノード電圧ベクトルを*v*とすると、次のノード方程式が成立する。

$$i = Yv \quad \dots\dots(2)$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} & \dots & Y_{0n} \\ Y_{10} & Y_{11} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n0} & \dots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

となる。

以上が、一般に用いられるノード方程式である。以降は筆者らのアイデアによる計算手法を解説していく。

3.3 並列設備の表現

(1) 表現概要

上記により、直列設備は線路*Y*行列で統一的に表現できることがわかった(直列設備であるSVRについては後述)。

次に並列設備であるが、従来の潮流解析では、負荷を定電力(*P* - *Q*)指定、発電機を定電力/定電圧(*P* - *V*)指定して、*N* - *R* (Newton-Raphson)法などの収束計算を行っていた。

筆者らは配電線系統に適用するための方法として、主電源は無限大母線として扱い、その他の一般負荷/特殊

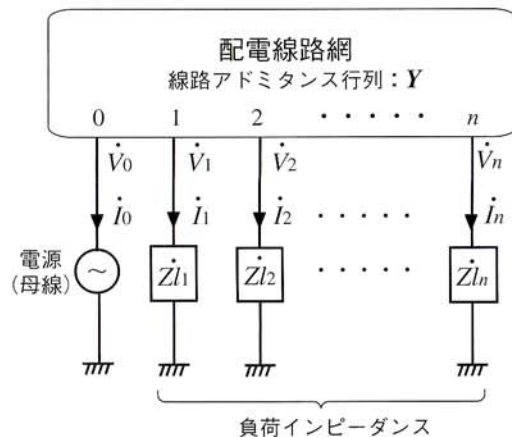
負荷/分散電源などは、それらを統一してインピーダンス表現する手法を開発した。

これらの並列設備をインピーダンス表現して、その逆数を取ることで負荷アドミタンス行列を作成して負荷を統一的に扱うことにする。

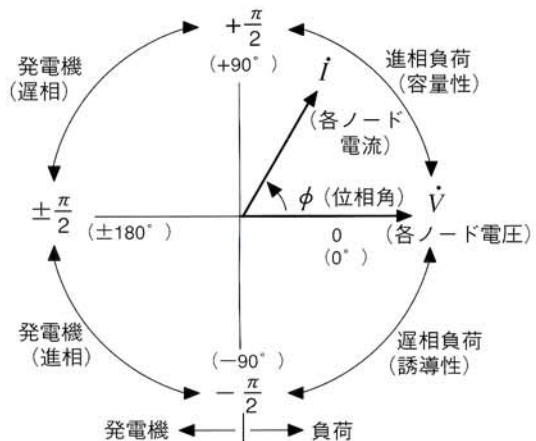
(2) インピーダンス表現

並列設備をインピーダンス表現する手法の概要を図4に示す。

図4(a)は基本回路図である。主電源の0番ノード以外はすべて負荷インピーダンス*Z_l*で表現するのが本手法の特徴である。この*Z_l*で負荷と分散電源とを統一的に表現できる。その様子を示したのが図4(b)である。ノード電流*i*は、ノ



(a) 基本回路図



負荷インピーダンス : $Z_l = Z_l e^{-j\phi}$ (定義)
 ノード電圧 : $\dot{V} = V$ (位相基準)
 ノード電流 : $\dot{i} = I e^{j\phi}$; $I = \frac{V}{Z_l}$
 ノード電力 : $\dot{P} = P + jQ = P_a e^{j\phi}$
 $= \bar{V} \dot{i} = \frac{V^2}{Z_l} e^{j\phi}$

* 位相基準は各ノード電圧

* 記号のノードサフィックスは省略

(b) ノード電流位相と負荷種別

図4 並列設備のインピーダンス表現

ード電圧 \dot{V} と負荷 \dot{Z}_l で、大きさ(I)と位相(ϕ)とが決まる。

ここで注目すべきは、この図内の式で示したように、 ϕ によって負荷の種別を選定できることである。すなわち、 ϕ が小さければ一般的な負荷であり、 $+\pi/2$ に近づけばコンデンサなどの進相負荷になる。逆に $-\pi/2$ ではリアクトルなどの遅相負荷になる。そして、 ϕ が $\pm\pi$ 付近になるのが分散電源などの発電機である。

このように、各種の並列設備を負荷インピーダンス \dot{Z}_l で統一表現すれば、電圧計算が非常に容易になる。

(3) 負荷の電圧依存特性

負荷(分散電源も含む)をインピーダンスで表現できることはわかったが、次に負荷特性が問題となる。負荷となる電気機器は、色々なタイプの電圧依存特性を持っている。この特性を大別すると、定インピーダンス特性、定電流特性、定電力特性の3タイプに分けられる。その概要を表1に示すが、該当する電気機器が必ずしもその3タイプに分けられるわけではなく、概ね中間的な傾向を示したり、有効電力と無効電力で特性が異なるなどしている。なお、表1には、各タイプの負荷を系統電圧計算に適用した場合の収束計算の必要性も記載してある。定インピーダンス負荷であれば収束計算が不要となり、最も取り扱い易い。

今回の計算手法では、基本的には定インピーダンス負荷を適用し、特に考慮が必要な負荷ノードについてのみ、定電力もしくは定電流の特性を付与して収束計算を行うようにした(詳細は後述)。このおかげで、計算の大幅な省力化が可能となった。

配電線系統の電圧解析では、前述のように主目的が定電圧管理であり、考慮すべき電圧の変化幅は小さいので、負荷の電圧依存性は、それ程大きな問題とはならない。

また、前述のように多種・多数の負荷に対して精密な負荷指定は困難であるため、区間負荷については平均的な扱いが行われる。

このような事情を考慮するならば、全般的には定インピーダンス負荷とし、注目すべき特定負荷のみを特性指定する方式であっても特に精度の面で問題とはならない。

表1 各種電気機器の電圧依存特性

特性種別	その特性に近い傾向を示す代表的な電気機器	電気的特性	収束計算の必要性
定インピーダンス特性	<ul style="list-style-type: none"> ・電熱器(電気こたつ、電気オープン、電気温水器) ・電球照明(白熱灯、ハロゲン灯) ・進相コンデンサ 	$Z \propto V^0$ $I \propto V^1$ $P \propto V^2$	不要
定電流特性	<ul style="list-style-type: none"> ・アーク炉、溶接機 ・電気メッキ装置 ・蛍光灯、水銀灯 	$Z \propto V^1$ $I \propto V^0$ $P \propto V^1$	必要
定電力特性	<ul style="list-style-type: none"> ・誘導電動機(空調、産業動力) ・インバータエアコン、TV等電子機器 ・分散電源 	$Z \propto V^2$ $I \propto V^{-1}$ $P \propto V^0$	必要

3.4 ノード電圧計算式

(1) ノード電圧計算の概要

送電系のノード電圧計算式は、負荷ノードを定電力指定(P-Q指定)とし、電源(発電機)を定電力/定電圧指定(P-V指定)として解析するため、ノード方程式が非線形方程式になってしまう。これを効率良く解くための手法、例えばN-R(Newton-Raphson)法などが研究されている。

しかし、筆者らの方法では、電源を無限大母線(定電圧電源)とし、負荷を一旦すべて定インピーダンスと仮定するため、ノード方程式は線形方程式になり、解析的に一発で解くことが可能となる。その後で特定ノードに注目して、指定条件により再計算するという手法により、見通しが良く、収束の早い計算が可能となる。

(2) 電圧計算式の導出

前出(3)式のノード方程式を展開して、各ノード電圧を求める解析式を導出する。図4にも示すように0番ノードは特別な基準となる定電圧ノードであるので、他の一般ノードと分離して考える。

(3)式での既知数は、線路アドミタンス \dot{Y} と定電圧源 \dot{V}_0 (= V_0)である。これにより、(3)式の1行目(\dot{I}_0 に関する式)を分離して、ベクトル、マトリックスの記号を再定義する。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v} &= \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \\ \mathbf{i} &= \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{10} \\ \vdots \\ \dot{Y}_{n0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{01} \\ \vdots \\ \dot{Y}_{0n} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

ここで(3)式の \dot{I}_0 の行に関する式は、

$$\dot{I}_0 = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{00} & \dot{Y}_{01} & \cdots & \dot{Y}_{0n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} \dots\dots(5)$$

すなわち、

$$\dot{I}_0 = \dot{Y}_{00} V_0 + \dot{Y}_0 v \quad \dots\dots(6)$$

となる。これが電源からの出力電流である。

一方、 \dot{I}_l 以降の部分は、

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{10} \\ \vdots \\ \dot{Y}_{n0} \end{bmatrix} V_0 + \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dots & \dot{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \dots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots(7)$$

すなわち、

$$i = y_0 V_0 + Yv \quad \dots\dots(8)$$

となる。

各ノード電流は、図4の負荷インピーダンス \dot{Z}_l と各ノード電圧によって計算できるので、ここで新たに、 \dot{Z}_l により作られる負荷アドミタンス行列 Y_l を定義する。

$$Y_l = \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{Z}_{l1}} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \frac{1}{\dot{Z}_{ln}} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(9)$$

これにより、ノード電流ベクトル i は下記となる。

$$i = Y_l v \quad \dots\dots(10)$$

この(10)式を、(8)式に代入して v を求めると(11)式が得られる。

$$v = (Y_l - Y)^{-1} y_0 V_0 \quad \dots\dots(11)$$

この式では、右辺はすべて既知であるので v は解析的に計算でき、収束計算なしで各ノード電圧を求めることが可能となる。

v が計算できれば、(6)(8)式で各ノード電流も計算できる。これで電圧計算の基本式が導出できた。

なお、これ以降の複素行列計算については、MATLAB^{※1}などの汎用の計算ツールで演算処理ができるので説明は省略する。

3.5 SVRの導入

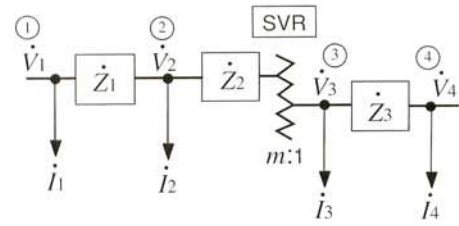
直列設備にSVRを導入すると、線路アドミタンス行列 Y に影響がある。これを、以下に図5の系統例をもとにして検討する。

なお、SVRの電圧レシオを m (=入力電圧/出力電圧)とし、SVRのインピーダンスは小さいので無視することにする。

(1) SVR挿入前

SVR挿入前の Y の行列要素を求める。これは $m=1$ の場合と同じである。

※1 MATLABは、米国 The MathWorks, Inc. の登録商標です。



・ SVRを③ノードに挿入
・ m : SVRの電圧レシオ

図5 SVRを挿入した系統例

① 自己アドミタンス

$$\dot{Y}_{22} = -\left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2}\right), \quad \dot{Y}_{33} = -\left(\frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3}\right)$$

② 相互アドミタンス

$$\dot{Y}_{23} = \dot{Y}_{32} = \frac{1}{\dot{Z}_2}$$

(2) SVR挿入後

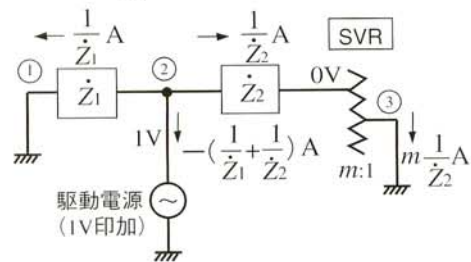
図6に、各ノードに基準電圧を印加した時の各部電流を示す。前出定義により各アドミタンスが求まる。

① 自己アドミタンス

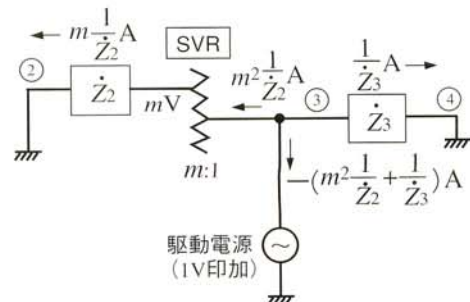
$$\dot{Y}'_{22} = -\left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2}\right), \quad \dot{Y}'_{33} = -\left(m^2 \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3}\right)$$

② 相互アドミタンス

$$\dot{Y}'_{23} = \dot{Y}'_{32} = m \frac{1}{\dot{Z}_2}$$



(a) ② ノード駆動時の各部電流



(b) ③ ノード駆動時の各部電流

図6 自己/相互アドミタンスを求める等価回路

(3) 一般式化

前述の例をもとに一般化を図る。図7(a)にj-kノードのk側にSVRを挿入した場合を示す。

なお、j側に挿入されることも無いとは言えないが、一般的には線路インピーダンスの後、負荷の直前という場合が多いのでk側にしてある。

① SVR挿入前 (m=1)

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{kk} &= -\left(\dot{Y}_{jk} + \sum \dot{Y} \right) \\ \dot{Y}_{jk} &= \dot{Y}_{kj} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 $\sum \dot{Y}$ は、 \dot{Y}_{jk} 以外でkノードに接続されているアドミタンスの総和である。

② SVR挿入後 (m≠1)

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}'_{kk} &= -\left(m^2 \dot{Y}_{jk} + \sum \dot{Y} \right) \\ \dot{Y}'_{jk} &= \dot{Y}'_{kj} = m \dot{Y}_{jk} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

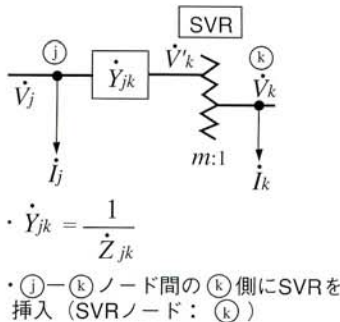
ここで、(13)式でm=1とした場合が(12)式となることがわかる。

③ SVRノードのY行列

以上のことから、j-kノードのk側にSVRを挿入することにより、線路アドミタンス行列は図7(b)に変更されることになる。

SVRのタップ切換による電圧計算は、この変圧比mを変えて計算すれば良い。式の形は変わらないので、SVR動作シミュレーションをする場合に有効である。

以上で、一般的な直列設備と並列設備を考慮した統一的な計算式が導出できたことになる。



(a) 系統図

$$Y' = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & m\dot{Y}_{jk} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & m\dot{Y}_{jk} & -\left(m^2 \dot{Y}_{jk} + \sum \dot{Y} \right) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{matrix} \dots \\ \dots \\ (j \text{ 行}) \\ (k \text{ 行}) \\ \dots \end{matrix}$$

Y': SVR挿入後の線路アドミタンス行列

(b) SVR挿入後のY行列

図7 SVRが挿入された系統 (一般化)

3.6 収束計算

(1) 収束計算の概要

前述のように、負荷が定インピーダンスとみなせる場合は、前出式(11)により、収束計算なしで、線路電圧を直接計算することができる。

配電線系統の電圧管理を目的とした解析では、問題とする電圧降下は小さく、例えば5%程度が対象となるため、負荷の電圧依存特性はそれ程問題とならない。

しかし、大口負荷や分散電源などの特殊負荷については、正確に電圧依存性を考慮する必要がある。これらの負荷については収束計算が必要になる。

(2) 定電流負荷

この場合は、(14)式に示すように電流の絶対値と負荷力率角を指定して計算を行う。

$$\begin{aligned} \dot{I}_R &= I_R e^{j\phi_R} \\ \dot{I}_R &: \text{指定電流値} \\ I_R &: \text{の絶対値} \\ \phi_R &: \text{の負荷力率角} \end{aligned} \dots\dots\dots(14)$$

この指定値から、定格電圧時における負荷インピーダンス \dot{Z}_l を計算し、その \dot{Z}_l で、電圧計算式(11)式によりvを求める。得られたvにより、 \dot{Z}_l を再計算し、再度(11)式を計算するという逐次代入法で収束計算を行う。

① 初回計算

定格電圧 $V_R (=6.6\text{kV})$ で負荷インピーダンスを計算する。

$$\dot{Z}_l^{(1)} = Z_l^{(1)} e^{-j\phi_R} ; Z_l^{(1)} = \frac{V_R}{I_R} \dots\dots\dots(15)$$

この初回値を用いて、(11)式で初回のノード電圧 $\dot{V}^{(1)}$ を求める。当然、 $\dot{V}^{(1)}$ は V_R と一致していないので、指定した電流に一致していない。しかし、力率は指定通りであるため、電流の絶対値のみ収束させれば良い。

② 2回目計算

初回の $\dot{V}^{(1)}$ で、負荷インピーダンスを再計算する。

$$\dot{Z}_l^{(2)} = Z_l^{(2)} e^{-j\phi_R} ; Z_l^{(2)} = \frac{V^{(1)}}{I_R} \dots\dots\dots(16)$$

同様に、(11)式で $\dot{V}^{(2)}$ が求められる。

③ n回目計算

n回目は次の式となる。

$$\dot{Z}_l^{(n)} = \frac{V^{(n-1)}}{I_R} e^{-j\phi_R} \dots\dots\dots(17)$$

収束条件については、簡易的な考え方として、この系統において、当該負荷の電流を変化させた時に、当該ノード電圧の変化がそれよりも少ない、すなわち

$$\Delta I_R / I_R > \Delta V / V$$

が成立すれば収束すると考えられる。例えば、負荷電流を10%変化させても、電圧変化が10%よりずっと少なければ収束する。通常の系統であればこの条件は十分成立する。

(3) 定電力負荷

定電力負荷、分散電源などについては定電力指定が行われる。この場合も定電流負荷と同様な手法で収束計算を行う。

電力指定は下の(18)式で行う。

$$\dot{P} = P_a e^{j\phi_R} \quad \dots\dots(18)$$

P_a : 皮相電力 (指定値)

ϕ_R : 負荷 (発電機) 力率角 (指定値)

① 初回計算

まず、複素電力の定義から、

$$P_a e^{j\phi_R} = \bar{V} \dot{I}_l = \bar{V} \frac{\dot{V}}{Z_l} = \frac{V^2}{Z_l} \quad \dots\dots(19)$$

となる。これから、

$$\dot{Z}_l = \frac{V^2}{P_a} e^{-j\phi_R} \quad \dots\dots(20)$$

となる。定格電圧 (V_R) で \dot{Z}_l を計算すると、

$$\dot{Z}_l^{(1)} = Z_l^{(1)} e^{-j\phi_R} ; Z_l^{(1)} = \frac{V_R^2}{P_a} \quad \dots\dots(21)$$

となり、(11)式からノード電圧 $\dot{V}^{(1)}$ が求められる。

② 2回目計算

$$\dot{Z}_l^{(2)} = Z_l^{(2)} e^{-j\phi_R} ; Z_l^{(2)} = \frac{(V^{(1)})^2}{P_a} \quad \dots\dots(22)$$

これから $\dot{V}^{(2)}$ が求められる。

③ n回目計算

$$\dot{Z}_l^{(n)} = \frac{(V^{(n-1)})^2}{P_a} e^{-j\phi_R} \quad \dots\dots(23)$$

定電流負荷の場合と同じく、絶対値のみの収束計算で良い。

収束条件は概ね、

$$\Delta Pa / Pa > 2\Delta V / V$$

となると考えられる。この条件は定電流負荷よりも若干厳しいが、通常の配電線系統にあつては十分成立する条件である。

(4) 収束計算回数

収束計算の打ち切りは、誤容精度 ε を導入して、

$$|\dot{V}^{(n)} - \dot{V}^{(n-1)}| < \varepsilon \quad \dots\dots(24)$$

のような条件式を用いれば良い。

しかし、筆者らが実際に実系統を対象にして計算した経験では、定電流、定電力負荷が混在していても数回程度の計算回数で十分収束するので、簡易的には回数指定のみで十分実用になる。

3.7 系統電圧計算のまとめ

以上で、一般の配電線系統の電圧計算式を導出した。

この計算手法の特長を以下に示す。

① 簡単な計算式である

簡単な解析式一本で電圧を求めることができる。負荷／発電機の区別なく、統一的なインピーダンス表現で計算ができる。

② 収束計算が容易

定電流／定電力負荷のどちらでも、収束のための修正項はインピーダンスの絶対値の一項のみである。

このため、計算が容易になるとともに収束の見通しがつけやすい。

③ SVRの導入が容易

線路アドミタンス行列の一部要素の変更のみで、SVRが導入でき、タップ変更も容易である。このため、制御プログラムと結合してシミュレーションが簡単に実行できる。

④ パソコンで計算可能

汎用の行列演算ソフトツールを用いて、各ノード電圧を一斉に得ることができ、取扱いが容易である。

4 系統電圧解析例

4.1 電圧解析プログラム

(1) プログラム構成

前章で述べた計算手法に基づいて、筆者らは配電線系統の電圧や電流を求める解析プログラムを開発した。プログラム開発は複素行列演算が容易にできるMATLABを使用して行った。このプログラムの構成を図8に示す。

同図に示すように、SVRやSVCによる電圧調整の様相を解析するためには、線路電圧降下補償器(以下LDC)による90リレーの入力電圧計算や、90リレーの動作、それと連携したタップ切替処理およびノード電圧計算などを行う必要がある。

以下、各計算モジュールについて、概要を説明する。

(2) ノード電圧計算モジュール

SVRやSVCのタップが切替わるごとに、ノード電圧計算を行う。すなわち、SVRモジュールから電圧レシオを、SVCモジュールからその負荷インピーダンスを取得して、線路／負荷アドミタンス行列を再計算する。

そして、必要ならば逐次代入法により(11)式の収束計算を実行する。

(3) 90リレー入力電圧計算モジュール

SVRによる電圧調整では、負荷側区間の中間点の電圧を制御する方式が一般的に採用されている。それを実現するために、線路電流による電圧降下を補償するLDC方式が用いられる。

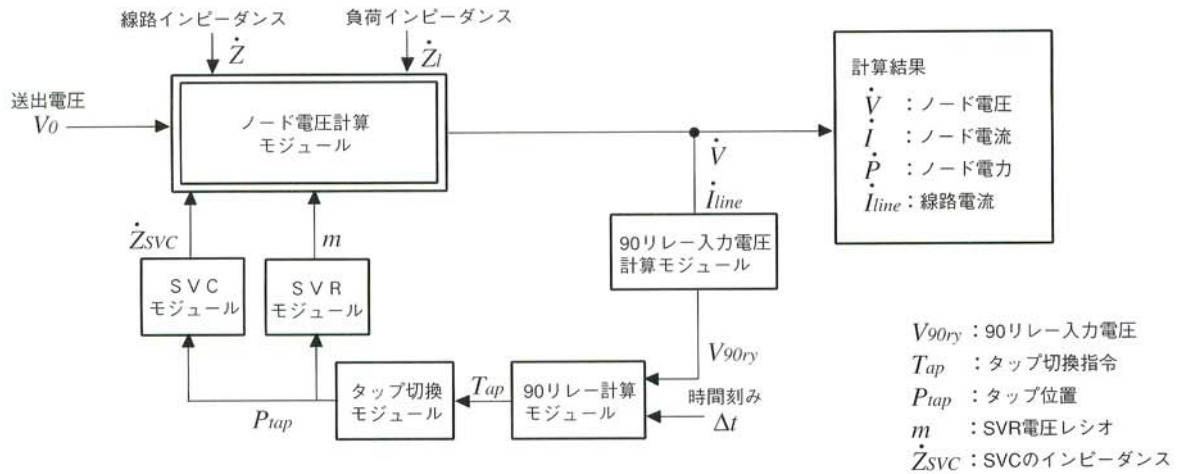


図8 電圧解析プログラムの構成

入力	V_{90ry} : 90リレー入力電圧 Δt : 時間刻み	出力	T_{ap} : タップ切換指令
処理	(1) タイマ処理 a) $V_{90ry} > V_{up}$ の時 : $T_{up} - \Delta t \rightarrow T_{up}$; タップ上げタイマ $T_{down} + \Delta t \rightarrow T_{down}$; タップ下げタイマ b) $V_{90ry} < V_{low}$ の時 : $T_{up} + \Delta t \rightarrow T_{up}$ $T_{down} - \Delta t \rightarrow T_{down}$ c) 上記以外の時 : $T_{up} - \Delta t \rightarrow T_{up}$ $T_{down} - \Delta t \rightarrow T_{down}$ 注) タイマの値は0以上に制限する。 (2) 動作判定処理 a) $T_{up} \geq T_d$ の時 : タップ上げ指令・・・ 1→ T_{ap} b) $T_{down} \geq T_d$ の時 : タップ下げ指令・・・ -1→ T_{ap} c) 上記以外の時 : タップ切換なし・・・ 0→ T_{ap} 注) a) または b) の時は、タイマの値を0クリアする。		
整定値	V_{up} : 上側基準電圧 V_{low} : 下側	T_d : 時限	

(a) 定限時型90リレー

入力	V_{90ry} : 90リレー入力電圧 Δt : 時間刻み	出力	T_{ap} : タップ切換指令
処理	(1) 積分計算処理 $(V_{low} - V_{90ry}) \Delta t + VT_{up} \rightarrow VT_{up}$; タップ上げ積分器 $(V_{90ry} - V_{up}) \Delta t + VT_{down} \rightarrow VT_{down}$; タップ下げ積分器 注) 積分値は0以上に制限する。 (2) 動作判定処理 a) $VT_{up} \geq k_r$ の時 : タップ上げ指令・・・ 1→ T_{ap} b) $VT_{down} \geq k_r$ の時 : タップ下げ指令・・・ -1→ T_{ap} c) 上記以外の時 : タップ切換なし・・・ 0→ T_{ap} 注) a) または b) の時は、積分値を0クリアする。		
整定値	V_{up} : 上側基準電圧 V_{low} : 下側	k_r : 積分整定値	

(b) 積分型90リレー

図9 90リレー計算モジュールの仕様

本プログラムでもこのLDC方式を模擬しており、その電圧補償計算式は、

$$\dot{V}_{90ry} = \dot{V} - \sqrt{3} m \dot{I}_{line} \dot{Z}_{ldc} \quad \dots\dots\dots(25)$$

\dot{V} : SVR設置点の電圧
 m : 電圧レシオ
 \dot{I}_{line} : 入力電流
 \dot{Z}_{ldc} : LDC整定インピーダンス

である。

この式で計算した電圧がSVRを制御する90リレーの入力電圧になる。LDCによる電圧補償がない場合には、その整定インピーダンスを0とする。

一方SVCによる電圧調整は、設置点の電圧そのものを制御する。したがって、設置点の電圧そのものが、SVCを制御する90リレーの入力電圧になる。

(4) 90リレー計算モジュール

90リレーには定限時型と積分型の2種類があり、本プログラムでも、これらのリレー動作をシミュレートしている。どちらのリレーにおいても、前述した入力電圧とリレー整定値(基準電圧)とを比較計算してタップ切換指令を出力する。

90リレー計算モジュールの仕様を図9に示す。

① 定限時型90リレー

図9(a)に示したように、動作遅れ時間をカウントするために、タップ上げタイマとタップ下げタイマと呼ばれる2つのタイマを設けている。

リレー入力電圧と基準電圧とを比較し、その結果に応じて各タイマ値を Δt だけ増減する。そしてタイマ値が整定時限以上になったら、タップ切換指令を上げ、または下げ指令にする。

② 積分型90リレー

積分型リレーでは、図9(b)に示したように、リレー入力電圧と基準電圧との差電圧の時間積分を計算する。したがって本リレーには、定限時型のタイマに代わって、タップ

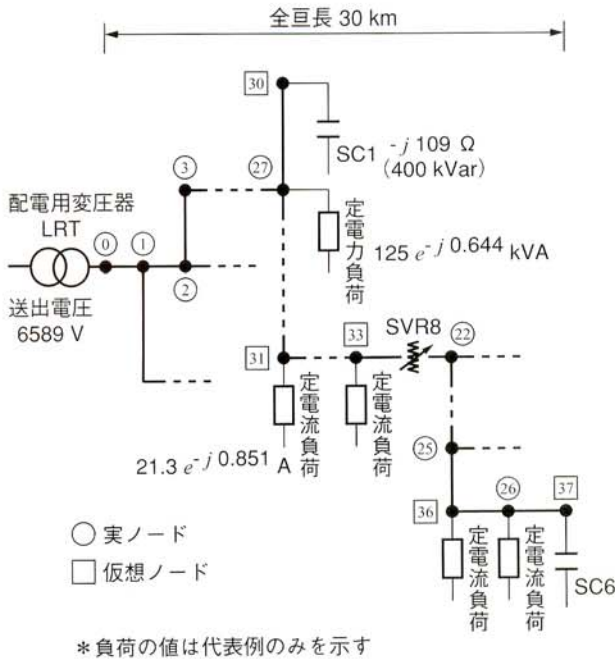


図10 解析対象とした配電線系統の概要

上げ積分器とタップ下げ積分器がある。

各積分器の計算値が積分整定値以上になったら、タップ切換指令を上げ、または下げ指令にする。

(5) タップ切換モジュール

90リレーから出力されるタップ切換指令を受けて、SVRやSVCのタップを切換える。タップには上限と下限があるので、上/下限を超えるような場合には切換指令は実行されない。

タップの上限と下限を同じにすれば、固定タップとすることもできる。

4.2 電圧調整シミュレーション

実際の配電線系統における電圧調整の様相を把握するために、本解析プログラムを使用して、シミュレーションを行った。ここに紹介する例は、中部電力株式会社の御好意により、配電線系統のデータ提供を受けて解析したものの中の一例である。

(1) 解析対象

解析対象として選んだ系統は、山間部にあって長距離にわたる配電線系統である。

その系統モデル図を図10に示す。この系統は、全亘長が30kmの単一フィーダ線で、負荷は18点あり、末端から1/3程度の部分に負荷が集中している。なお、解析精度を上げるため、区間分割のノード(実ノード:0~27番)以外に28番~37番のような仮想ノードを10点追加して、計38点のノードを設けている。

また、この系統には、電圧調整装置として8台のSVRと6台のSC(進相コンデンサ)が設置されている。

負荷種別については、電流指定の定電流負荷が大半を占めるが、定電力負荷、定インピーダンス負荷も混在している。

(2) 解析結果

①電圧調整の様子

8台目のSVRが設置されている22番ノードの電圧変化の様子を図11に示す。初期条件として、すべてのSVRは素通しタップ位置にしてシミュレーションを行った。今回の系統には、すべての負荷種別が接続されており、しかもSVRが8台も設置されているにもかかわらず、何の問題もなくシミュレーションが行っている。

電圧調整開始から450秒までは、すべてのSVRが昇圧方向にタップを切換えて電圧調整を行っている。その後、6台目を除く4台目以降のSVRで電圧調整が行われ、最終的に930秒で調整完了している。

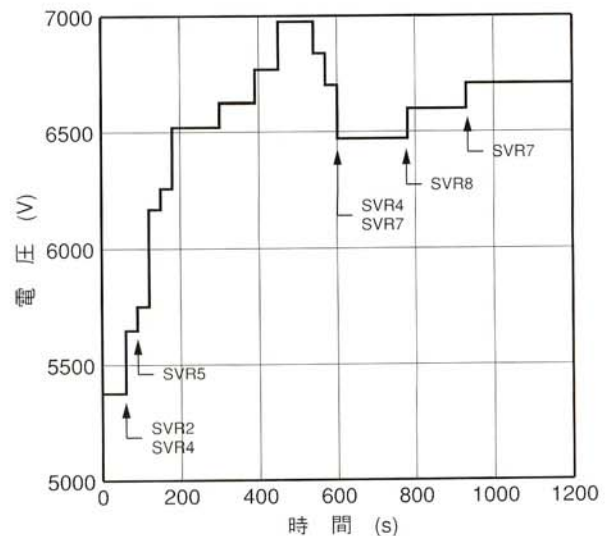


図11 特定地点(22番ノード)の電圧変化

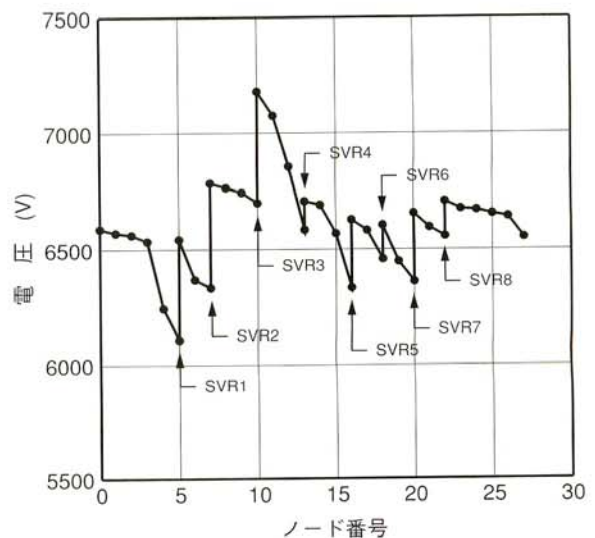


図12 配電線の電圧分布(ノード分布)

本図とSVRのタップ位置変化とから、電圧調整の様子が把握できる。

②ノード電圧分布

電圧調整が完了した930秒後の各ノードの電圧分布を図12に示す。同図において、SVRが設置されているノードでは、1次側と2次側の両電圧を示してある。この図から、SVRで系統電圧をほぼ一定に調整できることがわかる。

このように、配電線系統の電圧変動の様子が把握できる。

③実測値との比較

例として、0番、19番、21番、24番の4ノードにおける実測値と計算結果との比較を表2に示す。比較データは、ノード電圧と、そのノードから後の負荷系統の電流と力率、および有効・無効電力である。表2の(a)が計算結果で、(b)が実測値である。

この表では、力率値をのぞき、実測値より計算値の方が大きくなっている。しかし、線路上さまざまに分布している負荷を、平均化してノードに集約していることを考慮すれば、ほぼ一致していると考えられる。また精度的にも、この程度の誤差であれば問題とはならない。

表2 計算結果と実測値の比較

(a) 計算結果

ノード	ノード電圧[V]	線路電流[A]	力率	有効電力[kW]	無効電力[kVar]
0	6589	174.2	0.868遅れ	1726	-987
19	6448	101.2	0.883遅れ	997	-531
21	6596	39.7	0.949遅れ	430	-144
24	6670	9.5	0.827遅れ	91	-62

(b) 実測値

ノード	ノード電圧[V]	線路電流[A]	力率	有効電力[kW]	無効電力[kVar]
0	6589	151.2	0.925遅れ	1597	-662
19	6440	96.3	0.887遅れ	952	-496
21	6560	38.9	0.950遅れ	423	-138
24	6508	9.5	0.826遅れ	86	-58

5 あとがき

電圧調整装置や需要家設備を含めて、配電線系統を统一的にインピーダンス表現する方法を示した。そして、その概念の下に、従来からよく知られているノード方程式を見直し、一般的な配電線系統の電圧計算式を導出した。

さらに、この計算式を基にして、SVRなどによる電圧調整シミュレーションが可能な解析プログラムを開発し、実際の配電線系統に適用した。本稿ではその一例を紹介し、計算手法の有用性を示した。また、ここでは紹介しなかったが、負荷条件を種々変えて行うことにより、電圧変動対策の良否判定も手軽にできるようになった。

配電線系統の電圧制御・維持管理方法は、今後ますます高度で複雑なものになっていく。そのため、本稿で述べた

ようなシミュレーション手法の重要度も増しており、今後より一層の充実化を図っていく予定である。

最後に、本手法の開発およびデータの提供などに御協力いただいた中部電力株式会社殿、ならびに関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- (1)関根：『電力系統解析理論』電気書院(1971)
- (2)関根：『電力系統過渡解析論』オーム社(1984)
- (3)金、他：「分散型電源が連系された高圧配電線のリアルタイム最適送出電圧調整」電気学会・電力技術研究会資料、PE-95-184(1995)
- (4)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 Vol. 116-B No.1(1996)
- (5)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」電学論B Vol. 118-B No.6(1998)
- (6)梶田、他：「配電線用SVCの開発」愛知電機技報No.22(1999)

筆者紹介



佐藤 徹

電力事業部
配電自動化開発室 室長
配電線自動化システム・機器の開発およびパワーエレクトロニクス機器の研究、開発に従事



神部 晃

機器開発事業部
システム開発部
パワーエレクトロニクスG 主任
パワーエレクトロニクス機器の研究、開発に従事



川口 洋史

アイチーエマソン電機
技術本部
モータ制御関係の研究開発に従事。
現在米国留学中。