

対称座標法に基づく不平衡故障模擬を用いた不平衡 機器解析手法の効率化

藤原, 修平
九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻

河野, 良之
三菱電機株式会社系統変電システム製作所

北山, 匡史
三菱電機株式会社系統変電システム製作所

合田, 忠弘
九州大学大学院システム情報科学府電気システム工学部門

<https://doi.org/10.15017/20060>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 16 (2), pp.95-100, 2011-09-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所
バージョン：
権利関係：

対称座標法に基づく不平衡故障模擬を用いた不平衡機器解析手法の効率化

藤原修平*・河野良之**・北山匡史**・合田忠弘***

Improved Method for Transient Stability with Dynamic Unbalanced Condition

Shuhei FUJIWARA, Yoshiyuki KONO, Masashi KITAYAMA and Tadahiro GODA

(Received July 20, 2011)

Abstract: The symmetric coordinates are very popular method to model unbalanced faults in power system analysis. It is not only easy to handle with a single fault, but also it can be extended to multiple faults. But it is not easy to handle with situations whose unbalanced situations change continuously, like a SVC (Static Var Compensator) with unbalanced fault in power system or an unbalanced nonlinear load. Though, we had proposed a simulation method that can handle with these unbalanced and dynamic situations, it needs to handle with complex unbalanced faults. Under these situations, we will propose more efficient method.

Keywords: Power system, Transient stability, Fault calculation, Symmetric coordinates, Unbalanced fault

1. はじめに

本稿では実効値の過渡安定度解析において対称座標法に基づく不平衡故障模擬を用いて三相不平衡機器モデルを扱う方法¹⁾について、手法の効率化の提案を行う。

実効値の過渡安定度解析では対称座標に基づき三相不平衡を扱う方法が一般的に用いられている。この方法は不平衡部分の扱いは複雑となるが平衡部分の系統の扱いが容易であり高速に処理できる利点があるためである²⁾³⁾。そして多地点の不平衡故障の計算方法としてはこれまで、故障等価電流を注入する方法⁴⁾⁵⁾、故障等価インピーダンスを用いる手法^{1),7)9)}などが提案されている。これらの方法は系統の不平衡成分を故障等価電流あるいは故障等価インピーダンスで表現し正相回路に反映する方法であり、不平衡発生地点間の関係を表す電圧・電流の感度行列を使用することで実現している。

しかし、系統が三相不平衡状態でのパワーエレクトロニクス機器の解析や分散型電源等の相間に接続された単相の電源など、より複雑な不平衡状態の解析に対するニーズが高まりつつある。このような解析を実施するには系統側での不平衡状態の模擬と機器の発生する動的な不平衡成分を同時に解析する必要があるが、故障等価電流あるいは故障等価インピーダンスを用いる手法をそのまま使用するには困難が伴う。そこで筆者らは正相電流源と不平衡故障を組

み合わせて模擬する方法を提案した¹⁾。しかしこの手法により三相不平衡の機器モデルを模擬することは可能であるが、その手法は複雑な不平衡故障の組み合わせが必要である課題がある。

そこで本稿では、より効率的に三相不平衡機器モデルを扱う方法について提案する。まず従来手法の特徴と課題を整理し、そして対称座標法に基づく複合の三相不平衡故障計算について概要を述べる。次に従来手法に比べ、より効率的に逆相・零相の注入電流源を模擬する方法を提案する。さらに提案手法を用いた不平衡機器モデルについて記載し、最後にEMTP(Electro Magnetic Transients Program)との比較による精度検証を示す。

2. 従来の不平衡機器モデルにおける課題

2.1 従来手法の特徴

筆者らは実効値の安定度解析において三相の不平衡機器を模擬する方法として正相電流源と不平衡故障を組み合わせて模擬する方法を提案してきた。この方法は不平衡発生地点に不平衡故障を複数組み合わせたブランチと正相電流源を接続し逆相・零相の電流源を実現する方法であり、以下の特徴を持つ。

- ・過渡安定度解析等で広く使用されている対称座標法に基づく不平衡故障計算を使用するため実用性に優れる。
- ・大規模系統の一部に数点の支配的な不平衡が発生する解析を実施する場合に適している。なお提案手法は送電線の不平衡を扱うなど系統全体に不平衡成分が存在する解析には向いておらず、その場合は三相回路で解析を実施すべきである。

平成23年7月20日受付

* 電気電子工学専攻博士後期課程

** 三菱電機株式会社 系統変電システム製作所

*** 電気システム工学部門

2.2 従来手法の課題

従来手法の課題は以下が挙げられる。

(1) 計算の複雑さ

従来の手法は安定度解析のシミュレーション開始時に、不平衡故障を複数組み合わせたブランチと正相注入電流源を不平衡発生地点に追加するだけで、それ以後は、正相はもちろん逆相・零相の不平衡成分が変化してもアドミタンス行列を再作成する必要がない利点がある。そのため不平衡成分に非線形性を持つ機器の模擬も容易であるが、追加するブランチに設定する故障が複雑である課題がある。例えば逆相成分を模擬するためには2本のブランチと6カ所の不平衡故障を模擬する必要があり効率のとは言えない。

(2) 不平衡成分として零相成分を含む機器モデル

文献 1)においては線間に接続された並列機器のみモデル化の提示と検証を実施している。つまり不平衡成分として逆相成分のみ検証を実施している。また文献 10)に不平衡成分として逆相・零相成分を含む機器であるTCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)の各相制御モデルの実施例が報告されているが、その詳細は明らかにされていない。このため実効値の過渡安定度解析における動的な不平衡成分として逆相成分に加え零相成分も含む機器モデルについては、モデル化や検証は十分であるとは言えない。

そこで本稿では従来手法の効率化を提案すると共に、動的な不平衡成分として逆相成分に加え零相成分も考慮に入れることが必要な機器についてもモデル化の提示と検証を実施する。

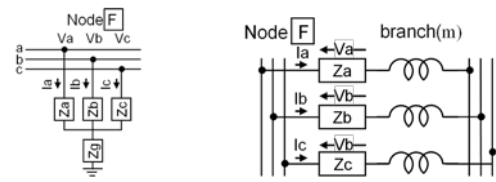
3. 不平衡故障線路を用いた不平衡機器モデル

3.1 対称座標法に基づく多地点不平衡故障計算

提案手法では多地点の不平衡故障を用いて不平衡機器をモデル化する。その不平衡故障の模擬方法として、対称座標法に基づき故障点間に故障等価インピーダンスを作成し正相回路に挿入する方法を採用している。詳細については文献 1)に記載しているので本稿では概要を記載する。

多地点の不平衡故障計算の手順は以下の通りである。

- ① Fig.1に示すように、故障地点の故障インピーダンス(Z_a, Z_b, Z_c, Z_g)を設定し故障点間(短絡・地絡故障は故障点と対地間、断線故障は断線点間)の電圧(V_a, V_b, V_c)と電流(I_a, I_b, I_c)の関係を立てる。
- ② 上記①に対し対称座標変換を実施し、正逆零相に変換した故障インピーダンスと故障点間の電圧・電流の関係に変換する。
- ③ 上記②の関係から逆相と零相を縮約し正相のみの電圧・電流の関係を表す故障等価インピーダンスを作成し、正相回路に織り込む。



(a) Ground or short circuit (b) Line open

Fig. 1 Representation of fault.

上記の処理により得られた故障等価インピーダンスは故障点間の電圧・電流の関係を対称座標法で表現し、正相成分だけの関係としたインピーダンスである。

故障等価インピーダンスは故障点が複数ある場合には各故障地点間の相互関係を持つ形態となる。例えばF点とG点の2地点故障の場合には故障等価インピーダンスは(1)式で示される関係を満たす。故障等価インピーダンス W^P を Fig.2 に示すように正相のアドミタンス行列に織り込むことで任意の故障を模擬する。

$$\begin{bmatrix} W_{FF}^P & W_{FG}^P \\ W_{GF}^P & W_{GG}^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F^1 \\ I_G^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_F^1 \\ V_G^1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで

I_F^1, I_G^1 : F点,G点の正相の故障電流
(断線故障では断線点間の正相の電流)

V_F^1, V_G^1 : F,G点の正相電圧
(断線故障では断線点間の正相の電圧)

W^P : 故障点に挿入すべき故障等価インピーダンス

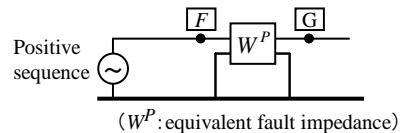


Fig. 2 Representation of fault with equivalent fault impedance.

3.2 不平衡故障線路による不平衡機器モデル

3.1 節で記載した手法は故障等価インピーダンスを作成し正相回路におり込むことで故障を模擬する。そのため SVC(Static Var Compensator)の様に正相回路と共に逆相回路の状態が時間と共に逐時変化する場合には計算時間ステップ毎に(1)式の故障等価インピーダンスを求め、Fig.2に示す様に正相回路に織り込んで正相回路を再作成する必要がある。また不平衡の定電力負荷のように正相回路以外に非線形要素がある場合にはアドミタンス行列を修正しながら収束を実施する必要が生じるため処理負担が大きくなる。

この課題は、逆相・零相の電流源を模擬出来れば解決するため、不平衡発生地点に不平衡故障を組み合わせたブランチと正相電流源を接続し逆相・零相の電流源を実現する(Fig.3 参照)。Fig.3 は母線(i)に不平衡が発生した場合の模

擬方法を示す。Fig.3 において追加したブランチは一方の母線(\$i)から正相電流を注入するともう一方の母線(i)からは逆相あるいは零相への注入電流源として変換される様に故障を組み合わせて設定する。

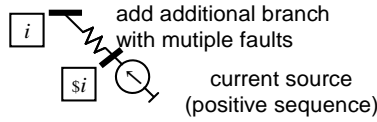


Fig. 3 The concept of adding a current source and branch with multiple faults.

3.3 逆相・零相への変換ブランチ

Fig.4, Fig.5 に Fig.3 で記載した追加ブランチの具体的な接続を示す。母線*i*は正相電流源を接続するための追加母線、*W^p*は変換ブランチである。逆相の変換ブランチは Fig.4 に示す故障を 3.1 節の方法で故障等価インピーダンスに変換し正相の母線*i*と母線*\$i*間に織り込む。なお、Fig.4 において不平衡故障として扱う必要があるのはBC相間の短絡故障のみであり、ブランチの正逆零相のインピーダンス*Z*については対称座標法では不平衡故障として扱う必要はなく、各対称成分のアドミタンス行列を作成する時に反映すればよい。零相についても逆相と同様に Fig.5 の故障を用いて変換ブランチを作成する。

従来の手法¹⁾では変換ブランチを全て相座標(abc相)で表現していたため、例えば逆相の場合には2本のブランチと複数の故障を用いる必要があったが、提案手法においては逆相、零相の変換ブランチいずれも1本のブランチと1つの不平衡故障で表現することが可能であり効率的となっている。

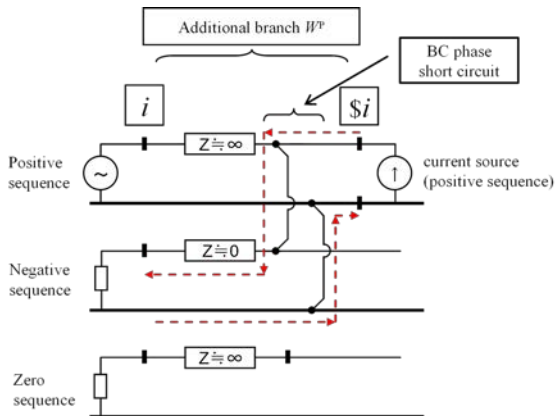


Fig. 4 Branches for negative sequence current source.

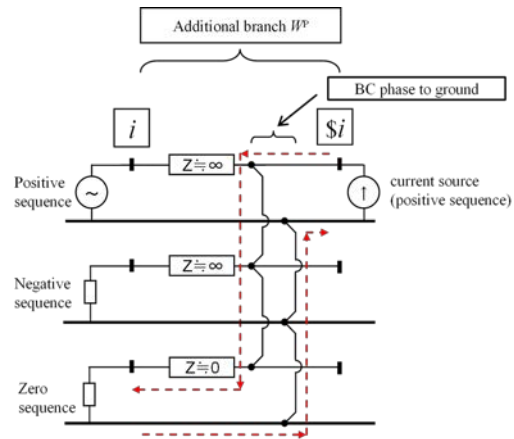


Fig. 5 Branches for zero sequence current source.

4. 機器モデルへの展開

前章では不平衡故障ブランチを用いて零相・逆相の注入電流源を構築する方法を示した。本章では機器モデルへの展開として正相回路以外に連続的に変化する特性を持つ機器を表現する例として SVC(Static Var Compensator)と TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)を記載する (Fig.6 参照)。なお本章では $\alpha = e^{-j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{j120^\circ}$ とし、添え字については、1は正相、2は逆相、0は零相、*a*は*a*相、*b*は*b*相、*c*は*c*相、制御目標値は*で表す。

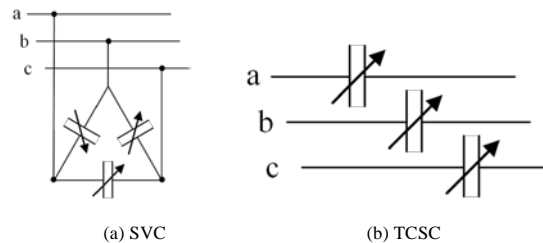


Fig. 6 Equipments whose conditions change continuously.

4.1 SVC

制御目標値であるコンダクタンスが *B** のモデルを Fig.7 に示す。SVC の正相回路のコンダクタンスと逆相回路のコンダクタンスがそれぞれ制御目標値 *B** に等しくなるように収束計算を行う。具体的には現在の反復回数を *n* とすると、①コンダクタンス *B** と正相電圧 $V_1^{(n)}$ 、逆相電圧 $V_2^{(n)}$ から SVC の正相電流目標値 $I_1^{*(n)}$ 、逆相電流目標値 $I_2^{*(n)}$ を求める。②系統計算を実施し新しい母線電圧 $V_1^{(n+1)}$ 、 $V_2^{(n+1)}$ を作成する。③収束したなら終了。そうでなければ①に戻る。なお本稿では正相電流と逆相電流が等しくなるモデル化について検討しているが、平常時の系統不平衡電圧を緩和させるための平衡化制御などを考慮する場合には正相と逆相それぞれ異なった制御目標値 *B** を与えることで模倣する。

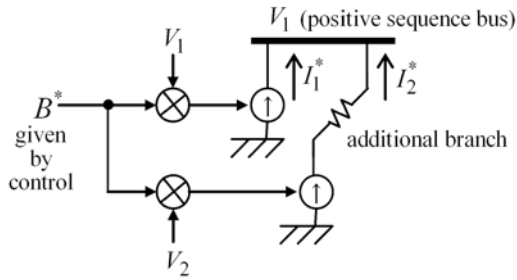


Fig. 7 Concept of SVC model using current injection.

4.2 TCSC

TCSCは制御目標値が変わるたびにアドミタンス行列の再作成をすれば模擬できる。例えば a 相の場合は Fig.8(a) のようになる。しかしこの方法は計算処理の負担が大きいため注入電流源を用いる方法を記載する。

a 相の場合、Fig.8(b)に示すようにブランチに電流 Ia^* を追加した場合のブランチ両端の電圧は(2)式で表される。ここで Ia は電流 Ia^* を注入する前にブランチに流れている電流、 $-jXa$ はブランチのコンダクタンス値である。

$$Va = -jXa(Ia + Ia^*) \dots\dots\dots(2)$$

Fig.8(a)のようにコンダクタンス値を $-jXa^*$ にした場合と同等の電圧電流の状態をブランチへの注入電流で模擬するには(3)式を満たすようにブランチの両端に電流を注入する。

$$Ia^* = Ia(jXa^* - jXa) / jXa \dots\dots\dots(3)$$

つまり Fig.8(b)に示すようにコンダクタンス値を変化させずブランチ両端に(3)式の電流を注入すると、Fig.8(a)と同じ電圧分布となる。b相、c相についても(3)式と同様に注入すべき電流 Ib^* 、 Ic^* が求められる。 Ia^* 、 Ib^* 、 Ic^* を対称座標法で表現すると(4)式となるので、 $I1^*$ を直接ブランチの両端に、また $I0^*$ 、 $I2^*$ を Fig.4、Fig.5 に示すブランチを介してブランチの両端に接続することでTCSCを模擬する。

$$\left. \begin{aligned} I_0^* &= Ia^* + Ib^* + Ic^* \\ I_1^* &= Ia^* + \alpha^2 Ib^* + \alpha Ic^* \\ I_2^* &= Ia^* + \alpha Ib^* + \alpha^2 Ic^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

Fig.9 に(4)式を適用した TCSC の概念を示す。なお(3)式において Ia 、 Ib 、 Ic は注入電流 Ia^* 、 Ib^* 、 Ic^* の影響を受けるので前節の SVC と同様に収束計算を実施する。

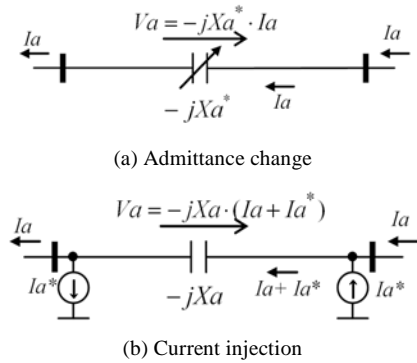


Fig. 8 Implementation method of TCSC model.

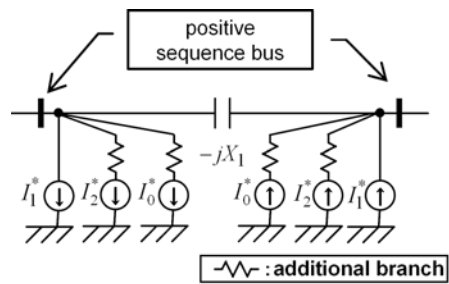


Fig. 9 Concept of TCSC model using current injections.

5. 有効性の検証

本章では提案した手法の有効性を示すため実効値の過渡安定度計算へ適用した例を示す。検証においては SVC と TCSC を対象にした。

5.1 SVC (Case 1)

5.1.1 検討内容

検討対象システムを Fig.10 に示す。末端母線 3 に Fig.11 の制御系を持つ SVC を設置し、時刻 0.1 秒に中間母線 2 において 2 相短絡を発生させた。不平衡電圧発生時の SVC は 4 章で例示した注入電流源を用いたモデルを使用した。

5.1.2 考察

SVC の出力電流を Fig.12 に示す。0.1 秒で短絡故障発生に伴い SVC が電流出力を開始し 0.125 秒で定常値に達している。SVC の逆相回路を模擬しているため SVC の逆相電流を制御指令に応じて連続的に変化させることができている。また同時に零相の電流が流れていないことも確認出来る。平常時のシステム不平衡電圧を緩和させるための平衡化制御、および事故時の不平衡状態での運転継続制御のためには、このような逆相回路の模擬が必要不可欠である。

Table 1 に EMTP との比較結果を示す。EMTP の計算においては時刻 0.15(秒)時点での SVC 出力指令値 B^* を読みとり固定のコンデンサとして模擬し phasor solution との比較を行った。Table 1 に示すとおり良好な一致が見られる。

以上より提案手法により不平衡機器の模擬方法を簡略しても良好な精度が得られていることが判る。

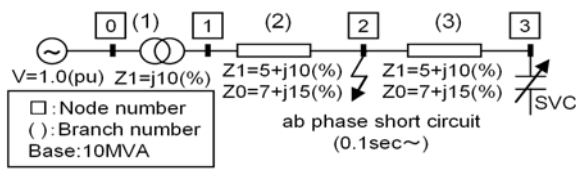


Fig. 10 Test system with SVC.

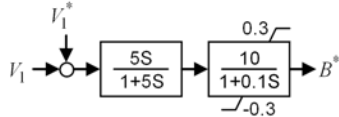


Fig. 11 SVC control model.

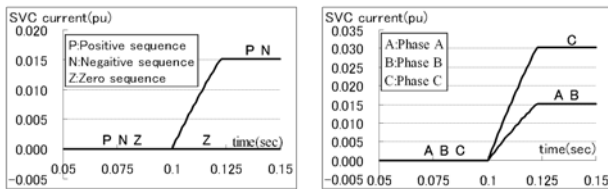


Fig. 12 Simulation result (Case1).

Table 1 Comparison with EMTP (Case1).

Item		EMTP(pu)	Proposed(pu)
SVC current	Ia	0.0151362	0.0151352
	Ib	0.0151362	0.0151353
	Ic	0.0302724	0.0302705
Voltage at node 3	Va	0.504541	0.504536
	Vb	0.504541	0.504537
	Vc	1.009077	1.009073

5.2 TCSC (Case 2)

5.2.1 検討内容

検討対象システムを Fig.13 に示す。母線 1 と母線 2 の間に TCSC を配置し、定常状態の容量を $-j15(\%)$ とした。ブランチ 1 の変圧器は簡便のため直接接地の YY 結線とした。系統事故はブランチ 4 において時刻 0.1 秒に A 相地絡を実施した。母線 0 に接続した発電機は電気学会 EAST10 機系統モデルの火力機の定数¹³⁾を使用し定格容量と定格出力のみ変更した。また TCSC の制御系は文献 10) を参考に簡便なモデルとした (Fig.14)。故障相の A 相は事故直後に制御系に 10pu の入力を与え、事故継続中は短絡電流を抑制する制御を行う。B 相と C 相の制御は母線 0 に接続された発電機の回転数偏差 $\Delta\omega$ を基に制御を実施する。

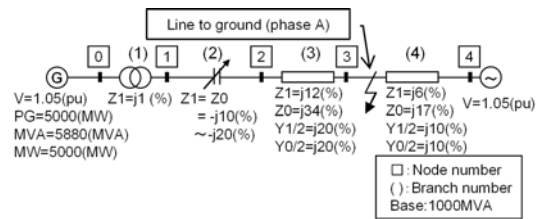


Fig. 13 Test system with TCSC.

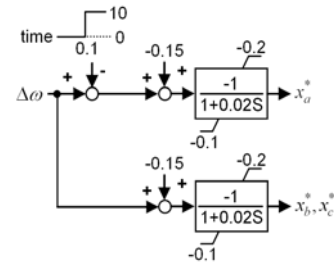


Fig. 14 TCSC control model.

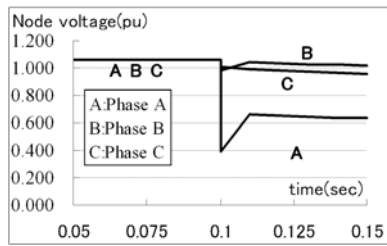
5.2.2 考察

Fig.15 に計算結果を示す。ブランチ 4 において時刻 0.1 秒に A 相地絡を発生させた (グラフ(a))。グラフ(b)に発電機の色度偏差を示す。図に示すとおり、事故後発電機の色度が上昇している。グラフ(c)に TCSC の制御目標値を示す。A 相については短絡電流を抑制する制御を実施し時刻 0.11 秒で指令値の上限に達している。B 相、C 相については発電機の色度偏差に応じて制御を実施しており、結果的に各相とも異なる制御となっている。

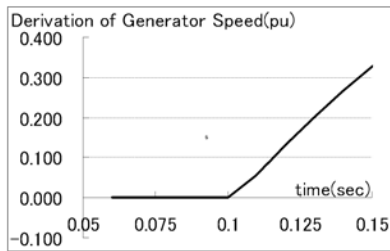
Table 2 に EMTP との比較結果を示す。EMTP の検証では時刻 0.14(秒)時点で提案手法の母線 0 の電圧値を読みとり EMTP 上に電圧源として模擬すると共に、提案手法の TCSC 出力指令値 x_a^*, x_b^*, x_c^* を読みとり固定の直列コンデンサとして模擬し phasor solution との比較を行った。Table 2 に示すとおり良好な一致が見られる。以上より、提案手法により不平衡機器の模擬方法を簡略しても良好な精度が得られていること、また逆相・零相回路両方に動特性を有する機器についても問題なく模擬出来ていることが判る。

6. おわりに

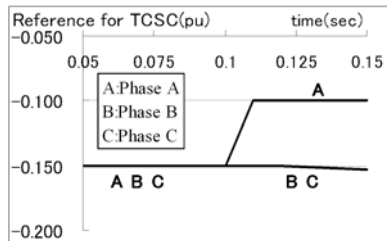
本稿では対称座標法に基づいて不平衡成分を扱いながらも不平衡発生時の正相回路以外の連続的なインピーダンス変化や三相不平衡の非線形負荷等も容易に模擬できる方法に対し、より効率化した手法の提案と検証を実施した。提案した手法を EMTP と比較し、結果として良好な精度を得たことを報告した。



(a) Voltage at Node 1



(b) Derivation of Generator Speed



(c) Reference for TCSC

Fig. 15 Simulation result (Case2).

Table 2 Comparison with EMTP (Case2).

(a) Node Voltage			
Node number	phase	EMTP(pu)	Proposed(pu)
1	a	0.6380091	0.6380100
	b	1.0220964	1.0220900
	c	0.9635640	0.9635630
3	a	0.0000337	0.0000285
	b	1.1862002	1.1861700
	c	1.2812847	1.2813000
(a) Branch Current			
Branch number	phase	EMTP(pu)	Proposed(pu)
2 (at node1)	a	7.17778	7.17741
	b	4.90617	4.90600
	c	5.75693	5.75686
4 (at node4)	a	11.12553	11.12530
	b	4.73921	4.73900
	c	5.96924	5.96917

参考文献

1) S.Fujiwara,Y.Kono,M.Kitayama,T.Goda:"Practical

Method for Transient Stability with Unbalanced Condition based on Symmetric Coordinates", *IEEEJ Trans.PE*, Vol.131, No.7, pp550-556(2011-7)(in Japanese).

藤原修平,河野良之,北山匡史,合田忠弘:「対称座標法に基づく不平衡故障模擬を用いた不平衡機器モデルの開発」, 電学論 B, Vol. 131, No. 7, pp.550-556 (2011-7).

- 2) 関根泰次「電力系統過渡解析論」オーム社,1984.
- 3) 新田目佳造「電力系統技術計算の応用」電気書院,1981.
- 4) K.Tanaka:"Multi-faults Method for Dynamic Stability Study of electric Power System", *IEEEJ Trans.PE*, Vol.113, No.3, pp237-245(1993-3)(in Japanese).

田中和幸:「電力系統の動特性解析のための多点故障計算手法」, 電学論 B, Vol.113, No.3, pp.237-245(1993-3).

- 5) K.Tanaka:"An Efficient Faults Calculation Method Including Mutually Coupled Lines of Power System", *IEEEJ Trans.PE*, Vol.115, No.2, pp.105-110(1995-2)(in Japanese).

田中和幸:「故障計算における零相回線間影響の効率的計算手法」, 電学論 B, Vol.115, No.2, pp.105-110(1995-2).

- 6) K.Tanaka:"Method of Mutually Coupling Effects of Multi-parallel Routes under Unbalanced Faults", *IEEEJ Trans.PE*, Vol.120, No.2, pp.227-233(2000-2) (in Japanese).

田中和幸:「多回線送電ルートにおける不平衡故障時の零相回線間影響の計算手法」, 電学論 B, Vol.120, No.2, pp.227-233 (2000-2).

- 7) 大浦好文,石黒富士雄,伊藤正伸:「不平衡・多重故障の一般化された計算法」, 電気学会電力技術研究会資料, vol.PE-86-87, pp.141-150(1986-8).

- 8) 柳橋健,猪俣繁,石黒富士雄,伊藤正伸:「T分岐3端子線路における一般化された不平衡・多重故障計算法」, 電気学会電力技術研究会資料, vol.PE-87-96(1987-7).

- 9) 月田自郎,柳橋健,石黒富士雄,藤原修平:「不平衡・多重故障の一般化された計算法の開発」,平成7年電気学会全国大会,1290,pp.6-106~6-107 (1995-3).

- 10) K.Takenaka,Y.Morioka:"Development of TCSC 3-phase model in dynamic stability analysis program", Annual Meeting Record I.E.E. Japan, vol.6-083, 2001(in Japanese).

竹中清,森岡靖夫:「動特性安定度解析手法(Y法)におけるTCSC各相制御モデルの開発」平成12年電気学会全国大会, 6-083 (2000-3).

- 11) 「電力系統の標準モデル」電気学会技術報告,第754号, (社)電気学会 電力系統モデル標準化調査専門委員会.