

事故電流高速検出法の三相事故による評価と発電機時定数補正

吉 永 淳*

The evaluation of the fast fault current wave detection method through 3 phase non-linear power circuit and the compensation of the presumed generator circuit time constant

Kiyoshi Yoshinaga

The method for detecting fault types and the fault current waves in transmission systems was proposed. This paper describes the fault types detecting algorithm in power systems and the evaluation of the investigated fast current detection using 3 phase non-linear power circuit. The influence in the time constant difference between the presumed and the actual values for current detection is studied. In the faults on generator circuits, transient and sub-transient time constant affect on the fault current wave shape. A revised parameter fitting method for generator circuit current detection is proposed.

1. まえがき

電力系統保護システムの一層の向上を図るためには事故形態と事故発生点の高速検知、事故の継続性有無の早期判断が重要な課題である。¹⁾

事故点・事故形態の高速検出および故障電流零点位相予測による遮断器開閉位相制御を目的として故障電流波形の高速検出法の検討を行っている。0.25 サイクル以内の高速検出の手段として、

故障電流を $i = \alpha_1 \cos \omega t + \alpha_2 \sin \omega t + \alpha_3 \varepsilon^{-t/\tau}$ の形で表現、パラメータ α_1 、 α_2 、 α_3 を最小二乗法で求める方法を提案し、計測電流誤差、波形歪、計算誤差などの影響を検討した。^{2)・6)}

ここではこれまでの検討に基いて電力系統における事故形態・事故点検出のアルゴリズムを整理するとともに、3相回路における各種事故発生時の電流検出評価を行った。

またフェーザパラメータ導出による高速電流検出法課題として、故障電流時定数を仮定した場合の誤差の問題がある。ここでは仮定した時定数と実回路時定数の差異の影響を評価検討した。

発電機回路事故電流は発電機の過渡特性によっては短絡初期に電流零点のない（ゼロミッシング）現象を生じる場合があり、直流分時定数のみ考慮したパラメータ導出ではこの現象を再現し難い。したがって発電機の過渡および次過渡時定数を考慮した事故電流パラメータ導出法による時定数補正方法を検討し、発電機回路事故電流波形検出の精度向上を図ることができた。

* 電気電子工学科

2. 3相回路による事故形態検出

2. 1 電力系統事故種類と事故形態・事故地点モデル

実際の電力系統は複数の電源系統が連係され複雑な回路を構成しているが、ここでは Fig.1 に示すような発電機、変圧器、送電線路、負荷からなる簡略化した電力系統回路による検討を行う。Fig.1 に示す系統において事故は変圧器の低圧側または高圧側で発生し、それぞれ発電機用遮断器、高電圧遮断器が事故除去を行う。発電機側は離相母線等を用いて事故を防ぎ遮断器を設置しない場合もある。高電圧系統で事故を生じた場合 3 相地絡、2 相地絡、2 相短絡、1 相地絡などがあり、低電圧側事故も同様である。また変圧器内部事故は巻線部位により低電圧または高電圧に準じて考えることができる。

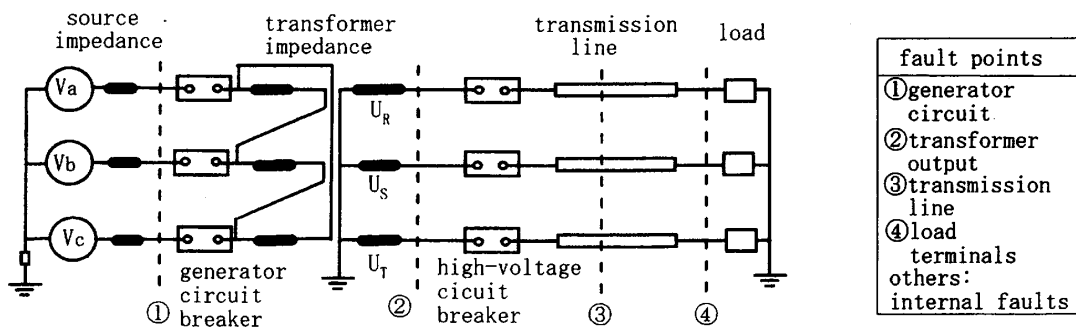


Fig.1 Equivalent circuit of a typical power system

各事故における定常状態の事故電流式を Table 1 に示す。UR、US、UT は高電圧側のフェーザ電圧を示している。また YF(= 1 / ZF) は電源から事故地点までの事故点アドミタンスであり、事故地点によって変化する。これに対し Ys(= 1 / Zs) は負荷電流を供給する健全相アドミタンスを示し、系統構成や機器定数をベースに事故以前に推定し得る値である。Table 1 ではアドミタンス表示しているが、インピーダンスで表わすこともできる。

電圧情報と健全相インピーダンスを定常状態で把握しておく。事故が発生すると電流計測により 4ms 以内に各相の事故電流波形および電流実効値を予測し事故相インピーダンスを計算する。これと予め設定した事故形態インピーダンスパターンと比較し事故形態、事故点の評定を行う。

fault	RΦ	SΦ	TΦ
1 Φ G	UR YF	US YS	UT YS
	UR YS	US YF	UT YS
	UR YS	US YS	UT YF
2 Φ G	UR YF	US YF	UT YS
	UR YS	US YF	UT YF
	UR YF	US YS	UT YF
2 Φ S	(UR-US) YF + UR YS	(US-UR) YF + US YS	UT YS
		(US-UT) YF + US YS	(UT-US) YF + UT YS
	(UR-UT) YF + UR YS		(UT-UR) YF + UT YS
3 Φ G	UR YF	US YF	UT YF

Table1 Fault types & currents

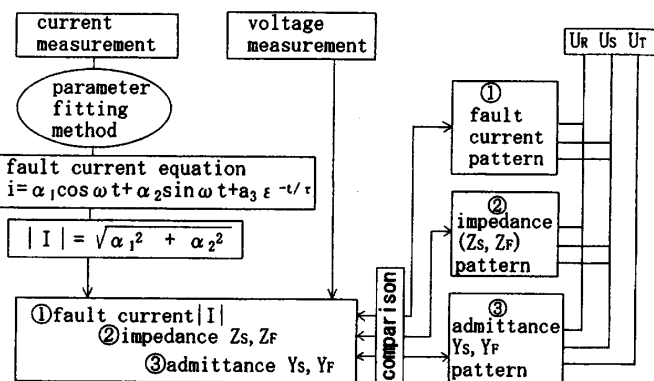


Fig.2 Example of fault type detection algorithm

各相の電流パターン例を Table1 に示す。Fig.1 に示した①～④の事故点に内部事故や識別可能レベルで送電線区間分割を変化した場合のインピーダンスの情報を加えていくつかの「事故インピーダンスモデル」または「事故電流モデル」を作成、これと予測電流計算データとの比較により、事故形態・事故点の予測が可能である。Fig.2 に事故モデルと予測電流実効値比較により事故形態を検出するアルゴリズム例を示している。事故モデルのパターンはアドミタンスまたはインピーダンスでよいが、電圧過渡変動の影響は電流パターンの方が小さいと考えられる。

3. 3相回路による各種事故電流計算と予測電流評価

3.1 回路と事故形態

回路は Fig.1 に示す回路をベースとし各機器、事故地点、事故形態は次の通りとした。

<機器> 発電機：22kV、1300MVA 変圧器： Δ -Y 結線、21.5kV/500kV、1280MVA
送電線路：全長 100km、5 段 π 回路模擬、1mH / km、負荷：500kW

<計算回路> 線形模擬回路および非線形模擬回路

- (1) 線形模擬回路：各機器のインピーダンスを求め線形インダクタンスおよび負荷抗で模擬した 3 相回路
- (2) 非線形模擬回路：発電機の過渡特性、変圧器の励磁特性など、機器の非線形特性を考慮した回路

<事故地点> ①発電機出力端（低圧側） ②変圧器出力端
③送電線(変圧器出力端より 20km 地点) ④受電端

<事故形態> 事故点①、②、③、④の各点とも次の 4 種類の事故を発生した。

・ 3 相地絡(3 Φ G) ・ 2 相地絡(2 Φ G) ・ 2 相短絡(2 Φ S) ・ 3 相地絡(3 Φ G)

3.2 3相事故電流計算と電流検出法適用

上記の条件で EMTP により事故前後の電圧電流を計算した。事故発生直後の電流値を 0.25ms 毎にサンプリングして、期間 4ms のサンプリング値から各相の電流式

$$i = \alpha_1 \cos \omega t + \alpha_2 \sin \omega t + \alpha_3 e^{-t/\tau}$$

を求め、 $\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \div \sqrt{2}$ より電流実効

値を計算する。この電流実効値と各相の電圧値からインピーダンスを求める。

事故発生時の電圧電流計算例を Fig.3 に示す。Fig.3 は非線形回路における③地点(送電線事故)の例で、事故形態は 1 相地絡である。また Fig.4 に 2 相地絡時の電流と

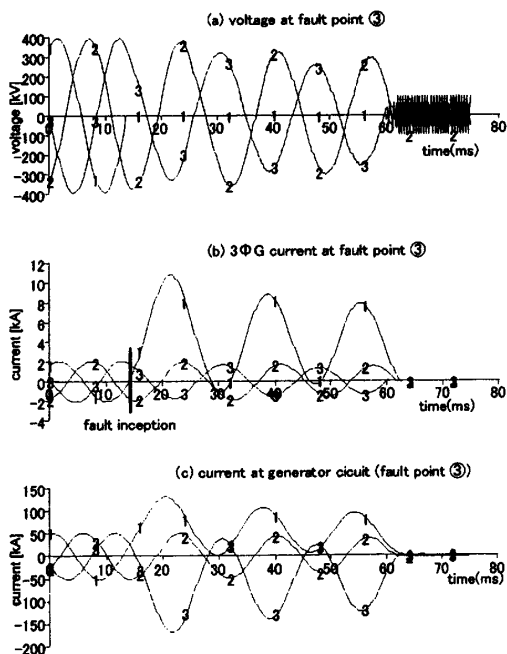


Fig.3. 3 phase fault voltages & currents (1 Φ G)

電流値サンプリングから求めた予測電流の例を示す。

Fig.5には事故点③における4種類の事故に対してEMTP計算による電流から直接求めたインピーダンスと、電流サンプリングに基づく予測電流から算出したインピーダンスを比較したものである。EMTPによる事故電流は、事故直後の値を波形から読み取ったものである。

Fig.5は事故点③における線形、非線形回路でのインピーダンス計算結果を示す。線形模擬回路の場合は、各事故形態における故障相、健全相の電流とも誤差率5%以内である。これに対し非線形模擬回路では、

故障相インピーダンスの誤差が8%以内であり、健全相インピーダンス誤差は故障相に比べて大きくなっている。非線形回路では電流の大きい故障相電流の場合の方が、鉄心の飽和などによる電流歪の影響を受ける可能性が強いと考えられるが、事故点③ではこの影響は顕著でない。健全相における誤差が大きい要因としては、①事故直後の電圧変動、遮断位相の変動による電流歪、②基準とした電流の読み取り誤差の影響等が考えられるがさらに検証が必要である。

以上の結果から、高圧側事故においては高速電流検出から8%以内の誤差率で、事故電流実効値の検出が可能であり、同時に事故インピーダンス（またはアドミタンス）の算出ができるという見通しが得られた。

Fig.6は事故点①の電流についての誤差率を示す。Fig.5の事故点③の場合に比べ誤差が大きい結果となっている。この事故は発電機の100%短絡であり発電機の非線形特性による影響が大きいものと考えられる。

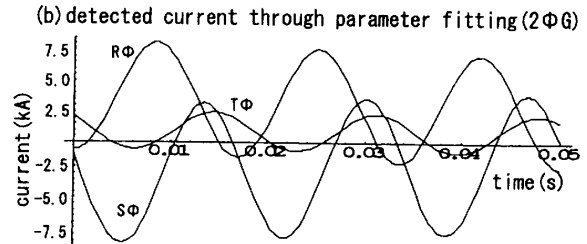
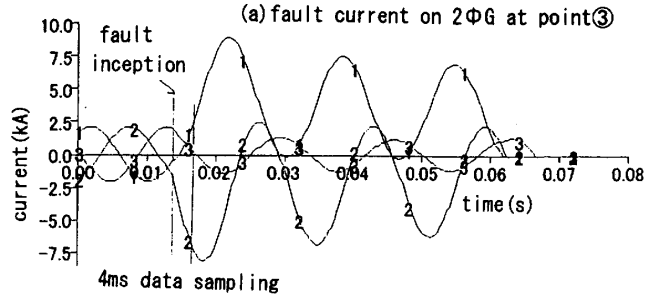


Fig.4. Fault currents & fast detected currents through parameter fitting method(2ΦG at ③)

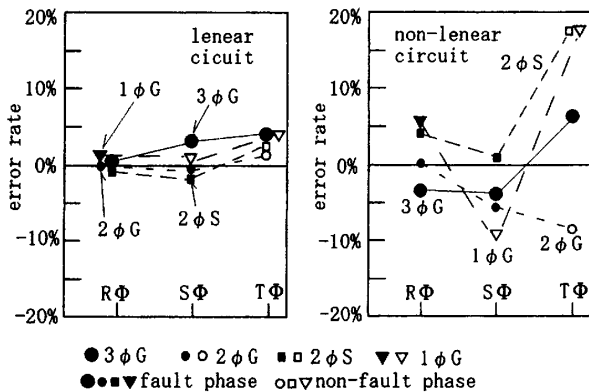


Fig.5 Error rate of fast detected current for fault current (fault point ③)

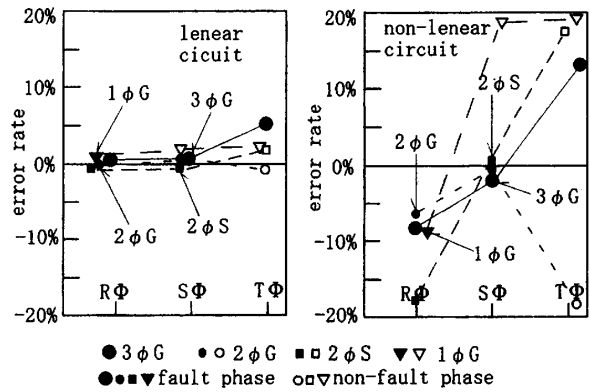


Fig.6 Error rate of fast detected current for fault current (fault point ①)

4. 時定数誤差の影響と補正

4. 1 時定数誤差の影響

電流フェーザパラメータ決定による電流波形予測では、回路の直流分時定数には推定値を設定して予測を行う。このため推定時定数と実事故回路時定数間に差異を生ずる場合がある。直流分時定数を変化したときの電流波形の例を Fig.7 に示すように電流零点に差異を生じる。Fig.8 は推定時定数 100ms に対し実回路時定数が 10ms、30ms、500ms、1000ms であったときの零点シフトの状況を示している。推定時定数と実回路時定数に大きな乖離があると零点シフトが大きくなり遮断器開極位相制御に影響する。

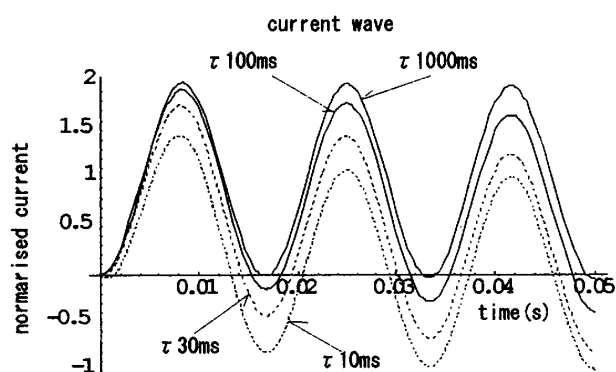


Fig.7 Current wave for time constant

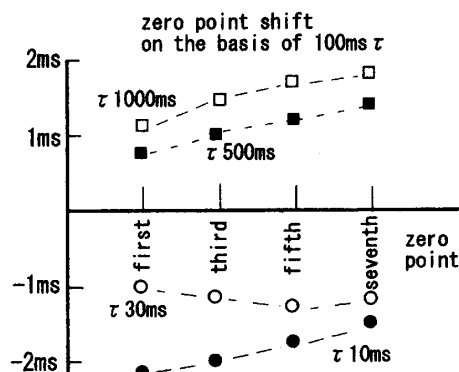


Fig.8 Current zero shift with time constant

4. 2 時定数補正について

事故電流は振幅 = 1 とした場合 $y_i = \sin \phi \cos \omega t + \cos \phi \sin \omega t - \sin \phi e^{-t/\tau}$ と表すことができる。 ϕ は回路定数および事故発生位相によって決まる位相、 τ は事故回路の時定数である。したがって事故発生後の電流計測サンプリング値を使用して時定数の計算が可能である。ただ、時定数計算と補正は予測計算時間内にオンラインで進める必要があり、① 計算時間を少なくする② データ誤差に対応できるなどの対策が必要になる。基本的な方法としては次の方法が考えられる。

(1) サンプリングデータ毎に時定数を算出する方法

サンプリング時間 x で、時間 ix 毎にサンプリングすると、電流は

$$y_i = \sin \phi \cos \omega ix + \cos \phi \sin \omega ix - \sin \phi e^{-ix/\tau}$$

サンプリング時間 x 、および ix が小さいことから指数関数部を一次近似が可能である。従って

$$y_i = \sin \phi \cos \omega ix + \cos \phi \sin \omega ix - (1 - \frac{ix}{\tau}) \quad \text{より時定数 } \tau \text{ を算出する。}$$

この方法ではデータごとに時定数を算出補正が可能であるが、事故直後の電流が小さい領域の計測誤差や波形歪の影響を受けやすい。

(2) データ引き算により電流差を大きくする方法

i 番目のサンプリングデータと (i+1) 番目のデータの差は

$$y_{i+1} - y_i = \cos \phi \{ \sin(i+1)\omega x - \sin i\omega x \} + \sin \phi \{ \cos(i+1)\omega x - \cos i\omega x \} - \sin \phi (\varepsilon^{-\frac{(i+1)x}{\tau}} - \varepsilon^{-\frac{ix}{\tau}})$$

となる。この差を $y_{n+1} - y_{n+1-1}$ まで順次加算すると次式を得る。

$$y_{n+1} - y_i = \cos \phi (\sin n\omega x - \sin i\omega x) + \sin \phi (\cos n\omega x - \cos i\omega x) - \sin \phi (\varepsilon^{-\frac{nx}{\tau}} - \varepsilon^{-\frac{ix}{\tau}})$$

指数関数を一次近似すれば

$$\tau = \frac{\sin \phi (nx - ix)}{y_{n+1} - y_i - (\cos \phi \cdot A_n + \sin \phi \cdot B)} \quad \text{ただし} \quad \begin{aligned} A_n &= \sin n\omega x - \sin i\omega x \\ B_n &= \cos n\omega x - \cos i\omega x \end{aligned}$$

の形となり、n 点に 1 回、その間の電流増加分から時定数を算出補正する。

(3) データの加算

電流データを i 点から n 個加算する。

$$\begin{aligned} \sum_i^{i+n} y_i &= \cos \phi \sum_i^{i+n} \sin \omega ix + \sin \phi \sum_i^{i+n} \cos \omega ix - \sin \phi \sum_i^{i+n} \varepsilon^{-\frac{ix}{\tau}} \\ &\cong \cos \phi S_n + \sin \phi C_n - \sin \phi + \frac{x}{\tau} \sum_i^{i+n} i \end{aligned} \quad \begin{aligned} S_n &= \sum_i^{i+n} \sin \omega ix \\ C_n &= \sum_i^{i+n} \cos \omega ix \end{aligned}$$

ただし

より時定数の算出が可能である。

歪のない事故電流波形の場合、計測電流値を使用して (1)、(2)、(3) のいずれの方法で時定数計算を行っても時定数の補正が可能である。波形歪のある場合計算時定数に誤差を生じるので、適用に工夫を要する。

5. 発電機回路事故電流の波形予測

発電機突発短絡では、発電機回路または発電機インピーダンスの影響が大きい地点の事故電流の直流分時定数の変化より先に交流分の減衰が生じ、初期電流が零点を通過しない現象（ゼロミッシング現象）を生じる場合がある。前述の 3 相非線形模擬回路においても発電機端子事故では同様の現象が生じている。この場合予測電流実効値誤差にも影響するが、特に電流零点シフトによる誤差が大きくなる問題がある。ここではこの発電機回路電流の予測計算法を検討する。

5. 1 発電機回路短絡電流

短絡事故直前の発電機電圧波高値を E_0 、事故発生時の位相を β とすると事故電流 i は

$$i = \frac{E_0}{x_d} \cos \beta \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}} + \left\{ \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_d''}} + \frac{1}{x_d} \right\} E_0 \sin(\omega t - \beta + \frac{\pi}{2})$$

ただし x_d : 同期リアクタンス x_d' : 過渡リアクタンス x_d'' : 初期過渡リアクタンス
 T_d' : 短絡過渡時定数 T_d'' : 短絡初期過渡時定数 T_a : 電機子時定数

と表すことができる。即ち交流分はほぼ 2 つの時定数により減衰する波形となる。

5. 2 発電機事故電流予測計算

上式から発電機回路事故電流データ値が次の式で変化すると仮定する。

$$y_i = (a + b\varepsilon^{-ix/\tau_1} + c\varepsilon^{-ix/\tau_2})(\alpha_1 \cos \omega ix + \alpha_2 \sin \omega ix) + \alpha_3 \varepsilon^{-ix/\tau_0}$$

ここで x はサンプリング時間、 i 番目の値を示している。また a, b, c は発電機の同期、過渡、初期過渡インピーダンスによって決まる値であり、 τ_1, τ_2 はそれぞれ短絡過渡時定数、短絡初期過渡時定数を表すものとし、また短絡過渡時定数は非常に大きいものとしている。

今 $A = a + b\varepsilon^{-ix/\tau_1} + c\varepsilon^{-ix/\tau_2}$ とおくと、計測電流データ y_i の尤度関数 χ^2 は

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{y_i - A(\alpha_1 \cos \omega ix + \alpha_2 \sin \omega ix) - \alpha_3 \varepsilon^{-ix/\tau_0}}{\Delta y_i} \right\}^2$$

ただし n はサンプリング点数である。 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ を $\partial \chi / \partial \alpha = 0$ より求めると次式を得る。

$$\alpha_1 \text{ ccg} + \alpha_2 \text{ scg} + \alpha_3 \text{ excg} = \text{kg}_1$$

$$\alpha_1 \text{ scg} + \alpha_2 \text{ ssg} + \alpha_3 \text{ exsg} = \text{kg}_2$$

$$\alpha_1 \text{ xcg} + \alpha_2 \text{ xsg} + \alpha_3 \text{ wxg} = \text{kg}_x$$

ここで各係数は次のように表せる。

$$\text{ccg} = \frac{1}{n} \sum A^2 \cos^2 \omega xi \quad \text{ssg} = \frac{1}{n} \sum A^2 \sin^2 \omega xi \quad \text{scg} = \frac{1}{n} \sum A^2 \sin \omega ix \cos \omega ix$$

$$\text{xcg} = \frac{1}{n} \sum A \varepsilon^{-ix/\tau_0} \cos \omega ix \quad \text{xsg} = \frac{1}{n} \sum A \varepsilon^{-ix/\tau_0} \sin \omega ix \quad \text{wxg} = \frac{1}{n} \sum \varepsilon^{-2ix/\tau_0}$$

$$\text{kg}_1 = \frac{1}{n} \sum A y_i \cos \omega xi \quad \text{kg}_2 = \frac{1}{n} \sum A y_i \sin \omega xi \quad \text{kg}_x = \sum y_i \varepsilon^{-ix/\tau_0}$$

A および A^2 は指数関数を含む関数である。 $\text{kg}_1, \text{kg}_2, \text{kg}_x$ はオンラインで高速計算を必要とするため一次近似で計算することとする。

発電機の各時定数、各リアクタンスは機種、容量によって異なる。大容量4極タービン発電機の代表的な定数例を Table2 に示す。

Rated parameters			Reactance (%)			Time constants (s)		
Capacity(MVA)	Frequency(Hz)	pole	x_d	x_d'	x_d''	T_d	$T'd$	T_a
1300	50	4	185	38	29	1.5	0.03	0.25

Table2 Typical reactance & time constants of a large capacity of turbo-generator
(from the Electrical Engineering Handbook)

Table2 の数値を参考にして上記 $A = a + b\varepsilon^{-ix/\tau_1} + c\varepsilon^{-ix/\tau_2}$ を設定した計算例を Fig.9 に示す。

Fig.9(a) は 3. 1 で述べた回路で大容量発電機の過渡特性を考慮した3相短絡電流計算の波形である。直流時定数減衰に対し交流分減衰が早く、短絡直後数サイクルは電流零点を通過

しない。 Fig9-(b) は事故直後 4ms 間の電流サンプリング値からフェーザ電流を予測計算している。この計算では、初期の過渡時定数を考慮していないため事故初期の零ミッシング現象を再現できていない。

Fig.9-(c) は上述の過渡時定数を考慮した補正計算結果を示す。(b)と比較し発電機電流に近い予測電流波形となっており上述の補正が有効であることを示している。

発電機回路特性の影響を受ける近傍回路でも、インピーダンスの比率を考慮して係数 A の値を選定することにより過渡時定数の影響による電流の予測計算精度を上げることができる。

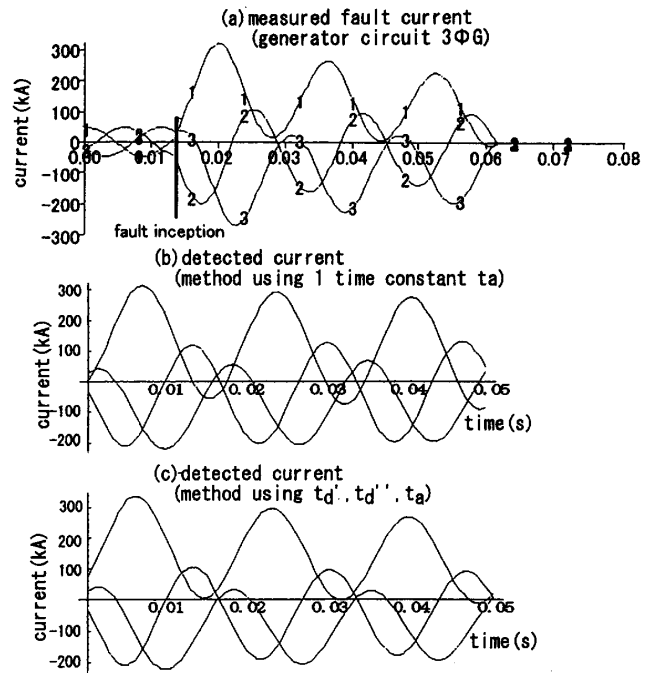


Fig.9 Zero missing current detection through revised parameter fitting method using td' , td'' , td

6. 結 言

フェーザパラメータ計算による事故電流

高速予測方法を用いた事故形態検出のアルゴリズムについて述べ、これに基づき 3 相回路での事故検出計算を行った。予測電流実効値から求めた事故インピーダンスは高压回路では 8 % 以内の誤差であった。これにより事故形態・事故点検出の可能性・有効性を検証できた。

発電機回路事故では、インピーダンス誤差は 10% を超える場合もあるがインピーダンス検出・事故形態検出には支障はないと考えられる。しかし遮断器操作には初期過渡特性による零ミッシング現象の検出が問題となる。これに対し発電機過渡特性を考慮したパラメータ決定法を検討し、補正が有効であることを示した。

参考文献)

- 1) Anton Poetl, Klaus Frohlich: "TWO NEW METHODS FOR VERY FAST FAULT TYPE DETECTION BY MEANS OF PARAMETER FITTING AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS" IEEE Transactions on Power Delivery, 1999
- 2) 吉永、高橋他: 「事故形態予測とデータサンプリングの検討」 電気関係学会連合大会論文集 2001年 11月
- 3) 吉永、藤井、坂口、亀井、伊藤他: 「故障電流検出と波形歪の影響」 電気学会全国大会論文集 2002年 3月
- 4) 吉永: 「事故電流高速検出法の検討」 福井工業大学研究紀要 第32号 2002年 3月
- 5) 吉永: 「事故電流波形高速検出における計測誤差・波形歪の影響」 福井工業大学研究紀要 第33号 2003年 3月
- 6) 吉永、千葉、亀井、堀之内、伊藤: 「故障電流検出における計測誤差、時定数の影響」 電気学会全国大会論文集 2003年 3月

(平成 15 年 11 月 27 日受理)