

原子力発電所の非常用所内電源系統の外部電源変圧器の一相欠相時のEMTPによる応答解析（去年の続報-1）

Transient evaluation using EMTP at one phase opening of the offsite power transformer of the emergency power supply systems for nuclear power plants
(This report is a follow-up the last year's.)

嶋田 善夫 (Yoshio Shimada) *1

要約 研究対象の原子力発電所の非常用電源系統は、福島第一原子力発電所事故に見られるように、非常用炉心冷却系統 (ECCS) 等に安定した電力を供給し、原子炉の安全を維持するうえで極めて重要な電源である。米国NRCは、規制文書 BL 2012-01, IN 2012-03を発行し、外部電源側がY結線、負荷側がΔ結線の変圧器など、ある種の巻線構成や鉄心構成では、外部電源系統に接続された変圧器の一相が、地絡のない欠相故障した場合に、低電圧保護リレーによる検出ができない問題を、電源系統の設計上の新たな脆弱性として検討を開始している。2013年のINSS JOURNALの論文は、三相変圧器の種々の巻線構成や鉄心構成の地絡のない電源側一相欠相時の応答および国内代表PWRプラントの地絡のない電源側一相欠相時の非常用電源系統および安全関連機器の応答に係る安全上の重要な問題点を、電気過渡応答解析コード (EMTP) によるシミュレーションを用いて明確に特定した。

続報として、本論文は以前の結果を簡潔にまとめ、変圧器の一次側において、一相が地絡のない欠相故障した場合に、一次側および二次側の両方で正常な電圧が維持される原理、および国内代表PWRプラントの非常用電源系統および安全関連機器の保護リレーの動作をEMTPによるシミュレーションにより解析した結果を報告する。

キーワード 非常用電源系統, 安全関連機器, 三相変圧器, 欠相, NRC, EMTP, 保護リレー

Abstract The emergency power supply systems of nuclear power plants, as the objects of this research, are critical to supplying stable electric power to such systems as the emergency core cooling system (ECCS), and to maintaining the safety of the nuclear power reactor; this was apparent from the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. The USNRC issued regulatory documents (BL 2012-01, IN 2012-03), and has commenced to review those problems which cannot be detected by degraded-voltage protection relays such as new design vulnerability of the power supply systems that are certain kinds of winding structures and iron core structures when the one-phase open fault occurs without a ground fault of the transformer connected to the offsite power supply system, including when the offsite power supply side is a wye connection and the load side is a delta connection etc. The report of the INSS JOURNAL 2013 used simulation by the electro-magnetic transients program (EMTP) and obtained findings that clearly specified the response at the time of the power supply side one-phase open without ground fault of various winding structures and various iron core structures of the three-phase transformer and identified the important issues for the response of emergency power supply systems and the safety related components of representative domestic PWR plants when the one-phase open fault occurred without ground fault.

In a continuation of the previous report, this paper summarizes the previous results, and then presents the principles by which normal voltages are maintained by both the primary and the secondary sides when the one-phase open failure without ground fault occurs on the primary side of the transformer, and the results of the analysis of operations of the protection relays of the emergency power systems and the safety related components of representative a domestic PWR plant by the simulation using EMTP.

Keywords emergency power supply system, safety related components, three phase transformer, open phase, NRC, EMTP, protection relay

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. 背景および目的

研究対象の非常用電源系統は、福島第一原子力発電所事故に見られるように、非常用炉心冷却系統 (ECCS) 等に安定した電力を供給し、原子炉の安全を維持するうえで極めて重要な電源である。米国NRCでは、規制文書「NRC BULLETIN 2012-01, DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM」⁽¹⁾ および「NRC INFORMATION NOTICE 2012-03: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM」⁽²⁾ を発行し、外部電源に接続された変圧器の一相が、地絡のない欠相 (開放) となった場合の設計問題を重要な問題と認識して、事業者に情報提供を要求するとともに、新たな設計の脆弱性として検討を開始している。

NRCが新たに認識した電源系統の設計の脆弱性のポイントは、外部電源側がY結線、負荷側がΔ結線の変圧器など、ある種の巻線構成や鉄心構成では、Y結線側 (外部電源側) の一相が地絡のない欠相 (開放) した場合、外部電源側の変圧器巻線、負荷側の変圧器巻線の両方で、正常な電圧が維持され、低電圧保護リレーによる保護ができない、また変圧器が負荷に電力を供給した場合も10%程度の電圧低下にとどまり低電圧保護リレーによる保護ができないなどの点である。米国事業者は、コンピュータ解析の実施や「A Practical Guide for Detecting Single-Phasing on a Three-Phase Power System by John Horak and Gerald F. Johnson, Basler Electric Company」⁽³⁾ の文献を参照して、上記のような設計問題について、米国NRCと問題意識を共有している。

また、わが国の新規制基準、実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第33条第3項には、「保安電源設備 (安全施設へ電力を供給するための設備をいう。) には、第一項の電線路、当該発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置への電力の供給が停止することがないように、機器の損壊、故障その他の異常を検知するとともに、その拡大を防止するために必要な措置を講じなければならない。」と規定されており、この規定への適合性についても検討が必要である。

2013年のINSS JOURNALの論文⁽⁴⁾ では、変圧

器のY結線およびΔ結線の単純な組合せを全て、およびYY結線にΔの安定巻線を加えた場合について、電気過渡応答解析コードEMTP⁽⁵⁾を使用したシミュレーションにより、一相が地絡のない欠相 (開放) した場合の変圧器の応答を明らかにするとともに、低電圧保護リレーによる非常用電源系統の保護の可否を明らかにした。また、国内代表プラントの安全関連の機器に電源を供給する変圧器外電側 (入力側) の地絡のない一相欠相の状況において、安全注入信号が発信し、ECCSなど安全関連負荷が順次起動した場合の変圧器および安全関連負荷の応答も、EMTPによるシミュレーションにより明らかにした。また、シミュレーション結果を踏まえて、現時点で考えられる変圧器外電側の地絡のない一相欠相に対する対応策を示した。

本論文の目的は、2013年のINSS JOURNALの論文の内容で不足していたと思われる内容を補足することであり、以下の項目を報告する。

- ① 2013年のINSS JOURNALの論文の結果を簡潔にまとめる。
- ② ある種の巻線構成や鉄心構成は、Y結線側 (外部電源側) の一相が地絡のない欠相 (開放) した場合、外部電源側の変圧器巻線、負荷側の変圧器巻線の両方で、正常な電圧が維持される原理を解説する。
- ③ 国内代表PWRプラントの地絡のない電源側一相欠相時の非常用電源系統および安全関連機器の保護リレーの動作検討をEMTPによるシミュレーションにより解析した結果を報告する。

2. 2013年のINSS JOURNALの論文の結果のまとめ

変圧器が無負荷時および負荷時に欠相した場合の電圧応答について

変圧器のY結線およびΔ結線の単純な組合せを全て、YY結線にΔの安定巻線を加えた場合、単相変圧器を外部でY結線およびΔ結線した場合、変圧器の鉄心が3脚、5脚の場合、無負荷時および負荷時の場合について、EMTPを使用したシミュレーションにより、一相が地絡のない欠相 (開放) をした場合の変圧器の応答を表1および表2に示す。

表1 無負荷時の変圧器一次側の一相欠相時のシミュレーション結果

巻線(鉄心)	電源側 相間電圧(pu)			負荷側 相間電圧(pu)			一相欠相時 低電圧保護の可否
	A-B	B-C	C-A	A-B	B-C	C-A	
Yg-Δ(3脚)	1	1	1	1	1	1	×
Yg-Δ(単相×3)	1	1	1	1	1	1	×
Δ-Yg(3脚)	0.5	1	0.5	0.87	0.87	0	×
Yg-Yg(3脚)	1	1	1	1	1	1	×
Yg-Yg(5脚)	0.8	1	0.7	0.8	1	0.7	×
Yg-Yg+Δの安定巻線 (3脚)	1	1	1	1	1	1	×
Yg-Yg+Δの安定巻線 (5脚)	1	1	1	1	1	1	×
Yg-Yg(単相×3)	0.57	1	0.57	0.57	1	0.57	○
Δ-Δ(3脚)	0.72	1	0.27	0.72	1	0.28	×

*○と×は、線間電圧70%, 2/3のロジックの低電圧保護の可否に基づく。

* Ygの添え字gは、中性点直接接地を示す。

* pu (Per Unit) 法は、基準値(ここでは定格電圧)に対する比率である。

表2 負荷時(50%, 力率0.8)の変圧器一次側の一相欠相時のシミュレーション結果

巻線(鉄心)	電源側 相間電圧(pu)			負荷側 相間電圧(pu)			一相欠相時 低電圧保護の可否
	A-B	B-C	C-A	A-B	B-C	C-A	
Yg-Δ(3脚)	0.9	1	0.98	0.9	0.9	1	×
Yg-Yg(3脚)	0.8	1	0.95	0.8	1	0.95	×
Yg-Yg+Δの安定巻線 (3脚)	1	1	1	1	1	1	×
Yg-Yg+Δの安定巻線 (5脚)	0.9	1	0.98	0.9	1	0.98	×

*○と×は、線間電圧70%, 2/3のロジックの低電圧保護の可否に基づく。

* Ygの添え字gは、中性点直接接地を示す。

* pu (Per Unit) 法は、基準値(ここでは定格電圧)に対する比率である。

3. 変圧器の一次側が地絡のない一相欠相(開放)をした場合に電圧が再生される理由⁽⁶⁾

変圧器の一次側が地絡のない一相欠相(開放)をした場合の電圧が再生される理由は、二次側のΔ巻線による場合、および3脚鉄心の磁束による場合がある。

(1) Yg-ΔおよびYg-Yg+Δの安定巻線の場合

変圧器の結線が外電側Yg、負荷側Δおよび外電側Yg、負荷側Yg+Δの安定巻線で、地絡のない一相欠相(開放)をした場合は、3脚、5脚、単相変圧器×3など鉄心の構成に依存せずに、変圧器の一次側および二次側の電圧が維持される。

図1は、Yg-Δ変圧器の一次側のA相が、地絡の無い欠相した場合を示す。一次側の健全なB相およびC相のコイル W_B および W_C の電圧は、欠相後も正常な電圧が維持されることから、対応する二次側のコイルの電圧 V_{wb} および V_{wc} も正常な電圧が維持される。従って、二次側の V_{wa} は、

$$V_{wa} = -V_{wc} - V_{wb} \quad (1)$$

すなわち、欠相する前の

$$V_{wa} + V_{wb} + V_{wc} = 0 \quad (2)$$

の関係が、成立する。

従って、二次側の電圧 V_{wa} によって、一次側のA相コイル W_A にも正常な電圧が再生される。

このことから、Yg-Yg+Δの安定巻線の場合についても、同様の説明が可能である。

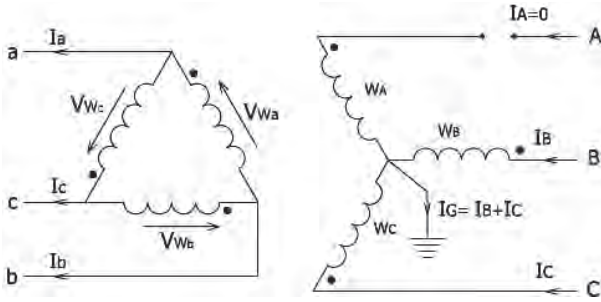


図1 Yg-Δ変圧器の一相欠相

(2) Yg-Yg (3脚) の場合

変圧器の結線が外電側Yg, 負荷側Ygで, 地絡のない一相欠相(開放)をした場合は, 3脚鉄心の場合にのみ, 変圧器の一次側および二次側の電圧が維持される。

Yg-Yg(3脚)変圧器の一次側のA相が, 地絡の無い欠相した場合, 図2のように健全なB相およびC相の磁束 ϕ_b および ϕ_c は, 欠相したA相の鉄心を通り過ぎて戻る。従って, 欠相したA相の磁束 ϕ_a は,

$$\phi_a = -\phi_b - \phi_c \quad (3)$$

すなわち, 欠相する前の

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0 \quad (4)$$

が成立している。

これは, A相鉄心には, 欠相の前後で全く同じ磁束が流れていることを意味しており, A相の一次側および二次側のコイル電圧 V_A , V_a は, 欠相前後で変化なく正常な電圧が再生されることを示している。

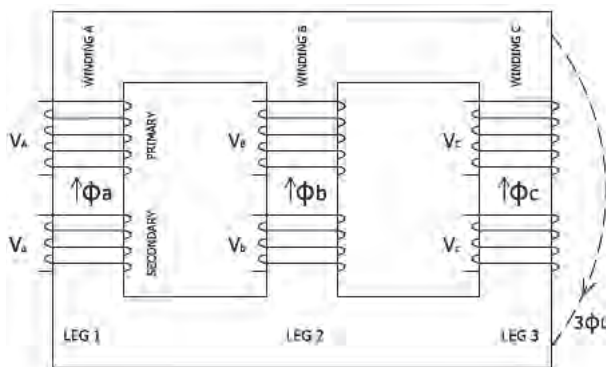


図2 Yg-Yg(3脚鉄心)の変圧器

4. 国内代表PWRプラントの地絡のない電源側一相欠相時の非常用電源系統および安全関連機器の保護リレーの動作

2013年のINSS JOURNALの論文⁽⁴⁾では, 国内代表プラントの安全関連の機器に電源を供給する変圧器外電側(入力側)の一相欠相のある状況において, 安全注入信号が発信し, ECCSなど安全関連負荷が順次起動した場合の変圧器および安全関連負荷の応答をシミュレーションした結果, 以下のことが分かった。

- ① 全負荷投入後の電圧の不均衡は, 10%程度である。一方, 電流については, 誘導電動機負荷が, 電圧の10%程度の低下にかかわらず不均衡が30%程度と大きくなる。さらに, 誘導電動機負荷単独では, 電流の不均衡が50%程度に拡大する。
- ② 不均衡により発生する変圧器の中性点電流が, 保護リレーの設定値を超えた場合, 変圧器がトリップする可能性が有る。
- ③ 一定の回転数(すなわち軸動力)を維持しようとする結果, 健全な2相の電流が増加するため, 保護リレーの設定値を超えた場合, 過負荷トリップする可能性が有る。
- ④ 誘導電動機負荷の起動時間および回転数は正常に維持されるが, 電動機の発生トルクが120Hzの相対的に大きい振幅で振動することから, 大きな騒音や振動が発生するものと推定される。
- ⑤ 結論として, 変圧器外電側(入力側)の地絡のない一相欠相を単一故障として仮定(単一故障基準)した場合のLOCAなどの事故時にECCSなど安全関連機器へおよぼす影響が明らかとなった。

本論文では, ①低電圧保護リレーおよびそれ以外の保護リレーが変圧器外電側の一相欠相により動作する可能性, ②主要な負荷(ECCS負荷, 海水ポンプ, 機器冷却水ポンプなど)が過負荷トリップする可能性について, シミュレーション結果に基づいて定量的に評価した。図3は, シミュレーションの単線結線図である。

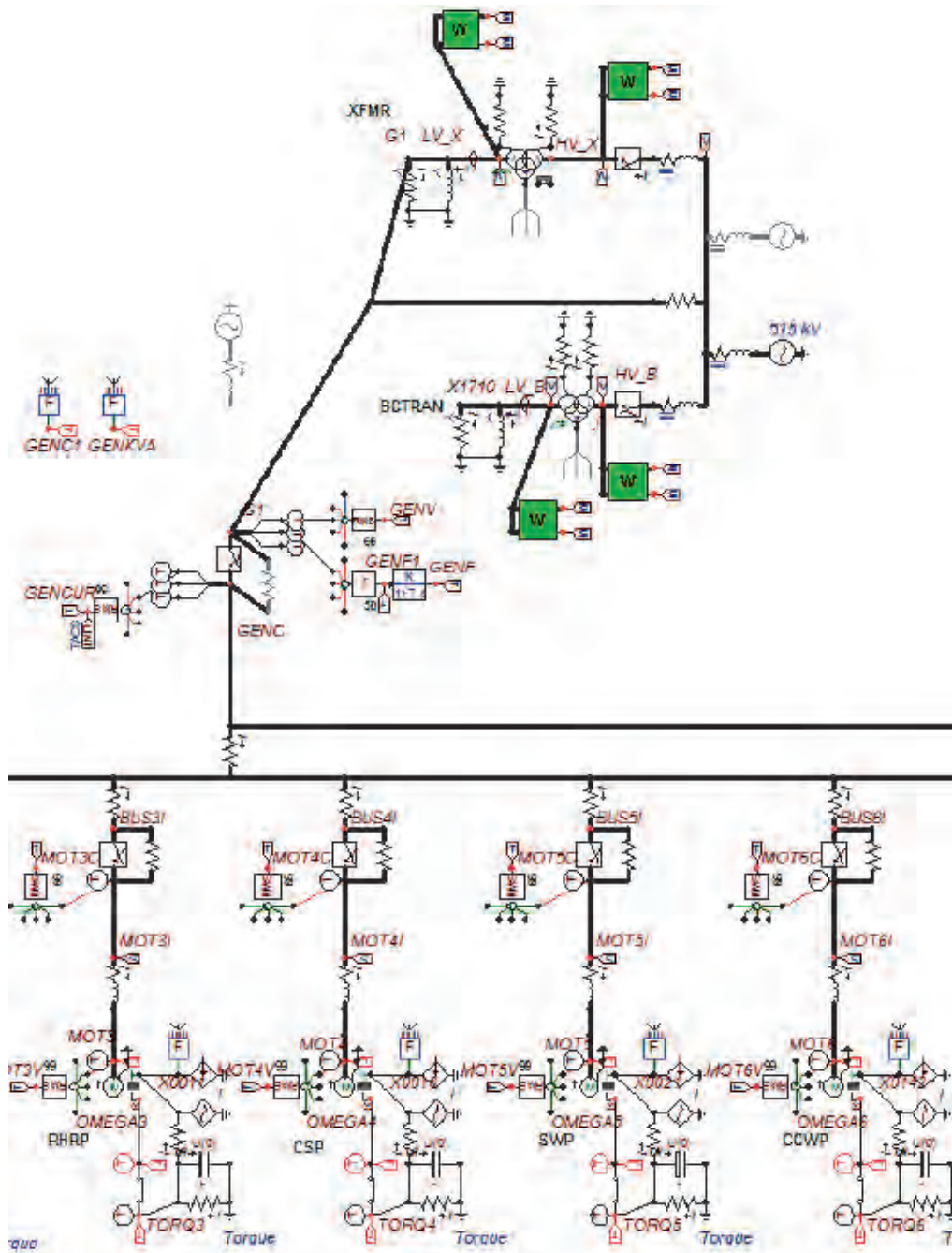


図3 単線結線図

(1) シミュレーションの条件：

- 変圧器の結線⇒外電側Y， 負荷側Y + Δの安定巻線
- 変圧器の鉄心⇒5脚
- 変圧器の容量⇒38MVA
- 変圧器の一次電圧⇒515kV
- 変圧器の二次電圧⇒6.9kV
- 変圧器の一次中性点接地⇒直接接地
- 変圧器の二次中性点接地⇒抵抗接地 (105.5 Ω)

- 変圧器の周波数⇒60Hz
- 変圧器のモデル⇒EMTPのハイブリッド変圧器
- 負荷⇒50%負荷 (19MVA (力率0.8)) + 安全注入信号による起動負荷
- 欠相⇒0.5秒でA相が欠相

(2) 低電圧保護リレーおよびそれ以外の保護リレーが、動作する可能性の評価

図4は、国内代表PWRプラントの変圧器外電側の一相欠相により動作する可能性が有る低電圧保護リレー(27)、比率差動保護リレー(87)、過電流保護リレー(51)、中性点過電流保護リレー(51G)、中性点過電圧保護リレー(64E)の系統図である。

(a) 低電圧保護リレー(27)の動作可能性評価

図5は、全負荷投入完了時点の各相の相間電圧である。各相の電圧実効値および位相角は、A-B相の基本波:5,756V∠-57.3°, 第二高調波:172.9V∠-28.1°, B-C相の基本波6,587V∠-176.3°, 第二高調波:339.9V∠-161.2°, C-A相の基本波:6,304V∠56.7°, 第二高調波:255.2V∠48.5°である。また、低電圧保護リレーの動作電圧は、4,800V(72.7%)である。

従って、6.6kV母線の低電圧保護リレー(27)は、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷条件において不動作である。すなわち、低電圧保護

リレー(27)による保護はできない。

(b) 比率差動保護リレー(87)の動作可能性評価

図6は、全負荷投入完了時の外電側の各相電流を示し、欠相のA相電流は0(A)、健全な2相の電流は増加し、位相も変化する。図7は、全負荷投入完了時の負荷側の各相電流を示し、誘導電動機負荷の影響で、電流と電圧の比例関係が成立しない、すなわち電流の不均衡は、電圧の不均衡より大きくなる。

外電側各相の電流実効値および位相角は、A相の基本波:0A∠90.0°, 第二高調波:0A∠90.0°, B相の基本波50.5A∠-85.3°, 第二高調波:1.3A∠-80.0°, C相の基本波:56.4A∠-164.2°, 第二高調波:2.919A∠-155.6°である。

負荷側各相の電流実効値および位相角は、A相の基本波:2,045A∠52.8°, 第二高調波:86.3A∠45.79°, B相の基本波2,620∠-53.6°, 第二高調波:83.0A∠-23.2°, C相の基本波:2,831A∠170.3°, 第二高調波:139.5A∠-167.9°である。

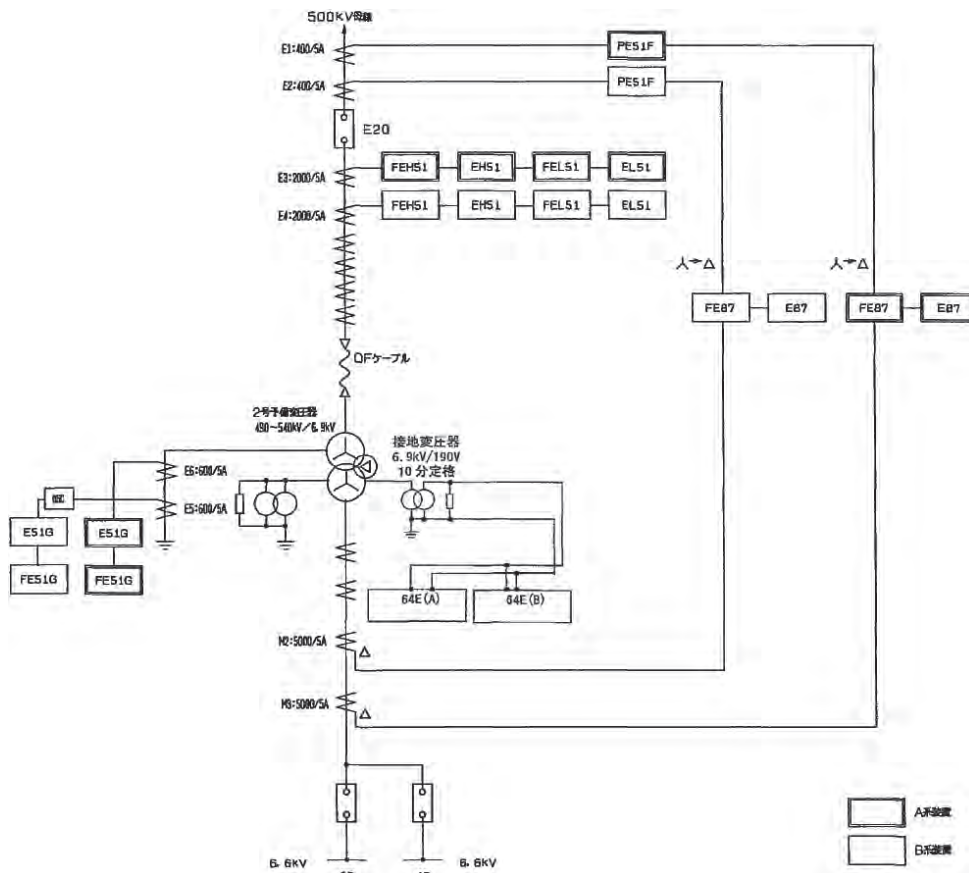


図4 国内代表PWRプラントの保護リレーの単線結線図

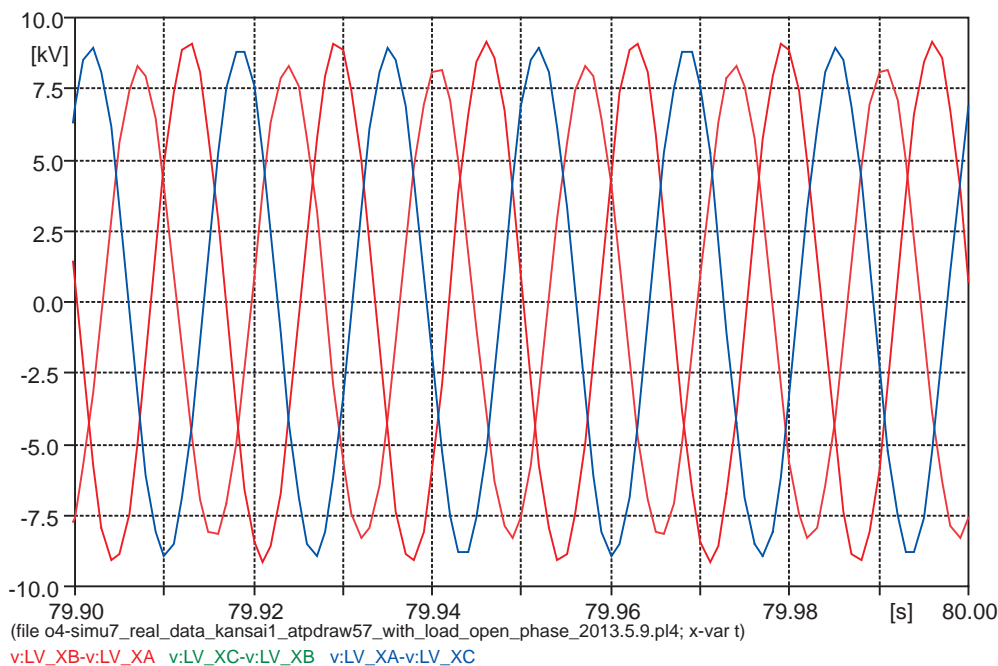


図5 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧（全負荷投入完了時）

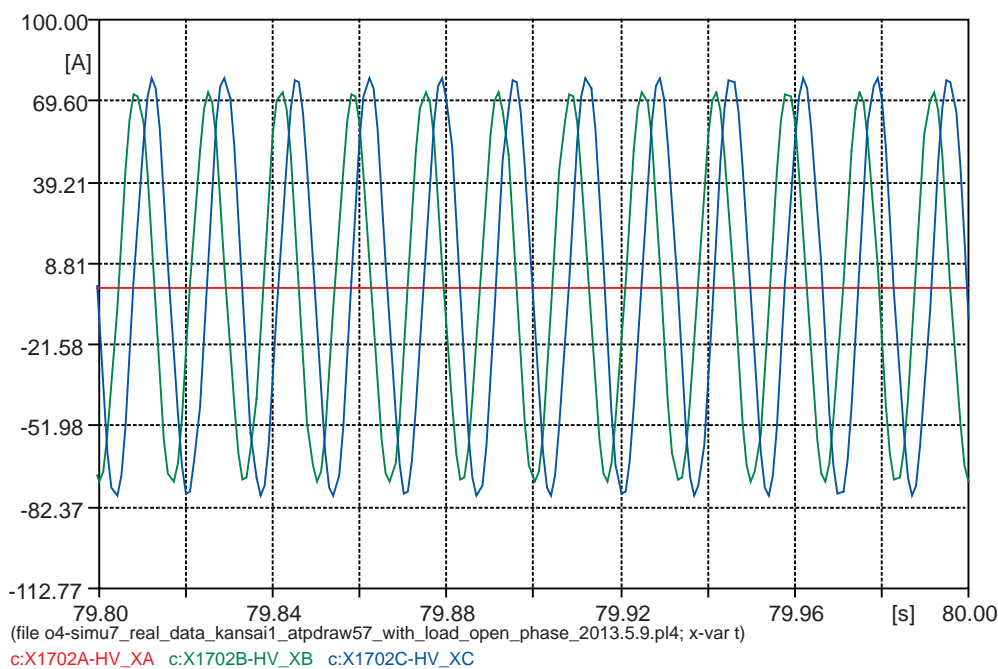


図6 変圧器外電側（入力側）の相電流（全負荷投入完了時）

この結果を線間電流に変換する。

a : 一次（外電）側	b : 二次（負荷）側
ac相 56.4A ∠ 15.8°	ac相 4,188.0A ∠ 16.0°
ba相 50.5A ∠ -85.3°	ba相 3,750.2A ∠ -85.1°
cb相 68.0A ∠ 149.1°	cb相 5,056.1A ∠ 149.3°

また、比率差動保護リレー（87）の基準電流値（タップ値）をCT一次側の電流値に換算した値は、一次（外電）側、二次（負荷）側それぞれ0.92A ×

$400/5 = 73.6A$ 、 $5.51 \times 5000/5 = 5,510A$ である。最小動作値は、50%である。

上記の結果から%換算値に変換する。

a : 一次（外電）側
ac相 $56.4A/73.6A=76.6\% \angle 15.8^\circ$
ba相 $50.5A/73.6A=68.6\% \angle -85.3^\circ$
cb相 $68.0A/73.6A=92.4\% \angle 149.1^\circ$

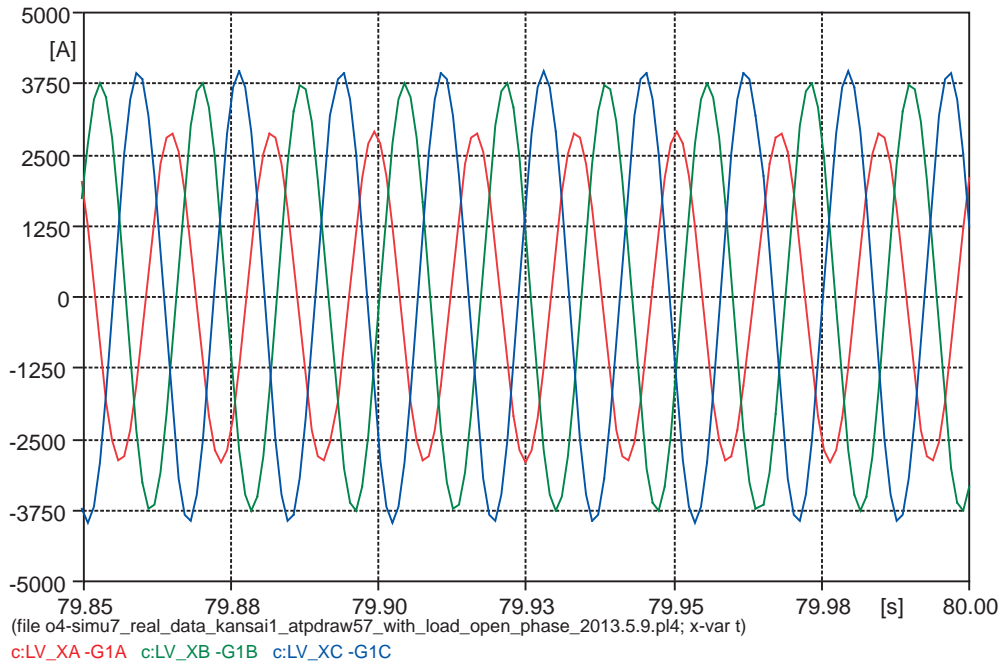


図7 変圧器負荷側（出力側）の相電流（全負荷投入完了時）

b: 二次（負荷）側

ac相 4,188.0A/5510A=76.0°∠16.0°

ba相 3,750.2A/5510A=68.1°∠-85.1°

cb相 5,056.1A/5510A=91.8°∠-149.3°

a: 一次（外電）側の%換算値-b: 二次（負荷）側の%換算値の値

ac相: 76.6% - 76.0% = 0.6%

ba相: 68.6% - 68.1% = 0.5%

cb相: 92.4% - 91.8% = 0.6%

従って、上記の値は、最小動作値の50%より小さいため、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷条件において比率差動保護リレー(87)は不動作である。すなわち、比率差動保護リレー(87)による保護はできない。

(c) 外電側過電流保護リレー(51)の動作可能性評価

外電側各相の電流実効値および位相角は、A相の基本波: 0A ∠ 90.0°, 第二高調波: 0A ∠ 90.0°, B相の基本波: 50.5A ∠ -85.3°, 第二高調波: 1.3A ∠ -80.0°, C相の基本波: 56.4A ∠ -164.2°, 第二高調波: 2.9A ∠ -155.6°である。また、外電側過電流保護リレー(51)の動作電流は、 $2.0A \times 2,000/5 = 800A$ である。

従って、外電側過電流保護リレー(51)は、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷条件において不動作である。すなわち、外電側過電流保護リレー(51)による保護はできない。

(d) 負荷側過電流保護リレー(51)の動作可能性評価

負荷側各相の電流実効値および位相角は、A相の基本波: 2,045A ∠ 52.8°, 第二高調波: 86.3A ∠ 45.8°, B相の基本波: 2,620A ∠ -53.6°, 第二高調波: 83.0A ∠ -23.2°, C相の基本波: 2,831A ∠ 170.3°, 第二高調波: 139.5A ∠ -167.9°である。また、負荷側過電流保護リレー(51)の動作電流は、 $0.7A \times 2,000/5 \times 515/6.9 = 20,899A$ である。

従って、負荷側過電流保護リレー(51)は、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷条件において不動作である。すなわち、負荷側過電流保護リレー(51)による保護はできない。

(e) 外電側中性点過電流保護リレー(51G)の動作可能性評価

図8は、全負荷投入完了時の外電側の中性点電流である。外電側の中性点電流の実効値および位相角は、基本波: 82.6A ∠ -127.4°, 第二高調波: 3.5A ∠ -134.7°である。また、外電側中性点過電流保護



図8 変圧器外電側（入力側）の中性点電流

リレー（51G）の動作電流は、 $0.5A \times 600/5 = 60A$ 、第二高調波ロック値は、10%である。

従って、外電側中性点過電流保護リレー（51G）は、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷条件において動作する。すなわち、外電側中性点過電流保護リレー（51G）による保護はできる。

(f) 負荷側中性点過電圧保護リレー（64E）の動作可能性評価

図9は、全負荷投入完了時の負荷側の中性点電流である。負荷側の中性点電流の実効値および位相角は、基本波： $1.241A \angle 141.5^\circ$ 、第二高調波： $0.05A \angle 171.1^\circ$ である。また、負荷側中性点過電圧保護リレー（64E）の動作電圧は、30Vである。この動作電圧の時に、中性点に流れる電流は、 $30V/0.08 \Omega \times 190/6,900 = 10.3A$ である。

従って、負荷側中性点過電圧保護リレー（64E）は、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷

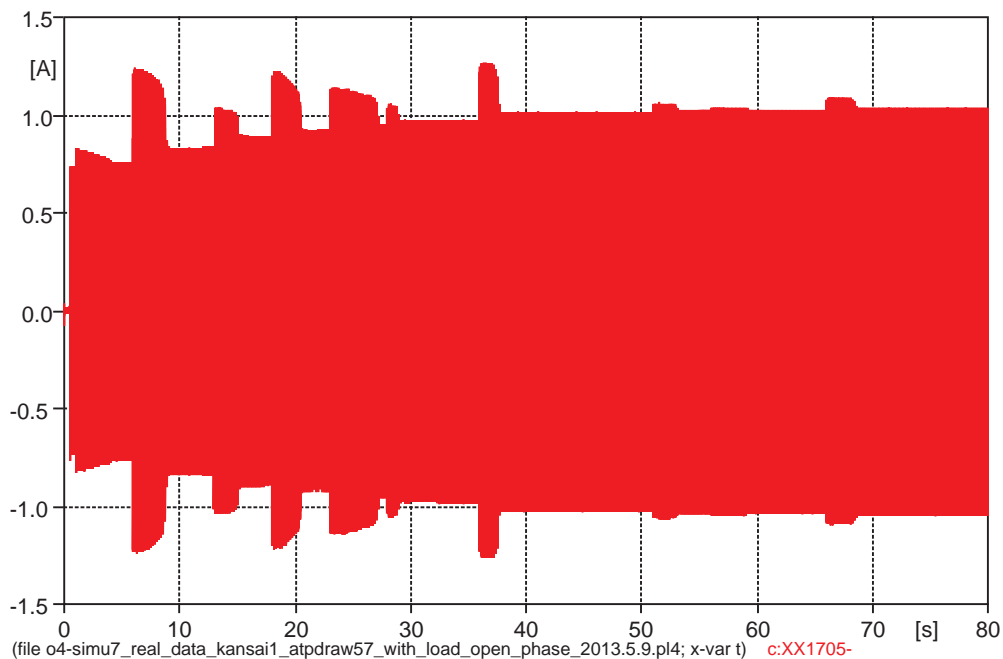


図9 変圧器負荷側（出力側）の中性点電流

条件において不動作である。すなわち、負荷側中性点過電圧保護リレー（64E）による保護はできない。

(g) (a) ~ (f) のまとめ

表3は、低電圧保護リレー（27）、比率差動保護リレー（87）、過電流保護リレー（51）、中性点過電流保護リレー（51G）、中性点過電圧保護リレー（64E）の動作/不動作の評価結果をまとめた。

結果は、外電側中性点過電流保護リレー（51G）のみ動作である。

表3 27, 87, 51, 51G, 64Eの動作/不動作の評価結果

保護リレー	動作値	動作/不動作
低電圧保護リレー(27)	4,800V(72.7%)	不動作
比率差動保護リレー(87)	50%	不動作
外電側過電流保護リレー(51)	800A	不動作
負荷側過電流保護リレー(51)	20,899A	不動作
外電側中性点過電流保護リレー(51G)	60A	動作
負荷側中性点過電圧保護リレー(64E)	30V	不動作

(h) ECCS関連負荷，海水ポンプ，機器冷却水ポンプなど主要な安全関連負荷の過負荷保護リレー（49）、過電流リレー（51，50）の動作可能性評価

図10は、一相欠相した状況において、高圧注入ポンプ運転中の各相電流を示す。各相の電流実効値および位相角は、A相の基本波：79.3A \angle -120.1°，第二高調波：3.1A \angle -128.2°，B相の基本波154.6A \angle 135.8°，第二高調波：5.6A \angle 167.5°，C相の基本波：155.5A \angle -14.5°，第二高調波：7.5A \angle 9.5°である。高圧注入ポンプの過負荷保護リレー（49）、過電流保護リレー（51，50）の動作電流は、それぞれ159.5A，217.5A，2000Aである。

従って、高圧注入ポンプの過負荷保護リレー(49)、過電流保護リレー(51, 50)は、一相欠相のある状況、かつシミュレーションの負荷条件において不動作である。

表4は、主要な安全関連負荷の過負荷保護リレー（49）、過電流保護リレー（51，50）の動作/不動作の評価結果を示す。なお、過負荷保護リレー(49)は、警報のみであり、トリップ保護はない。過電流保護リレー（51，50）は、トリップ保護を行う。その結果、海水ポンプ、原子炉補機冷却水ポンプ、電動補助給水ポンプの49リレーが動作することがわかった。それ以外の保護リレーは、不動作であった。

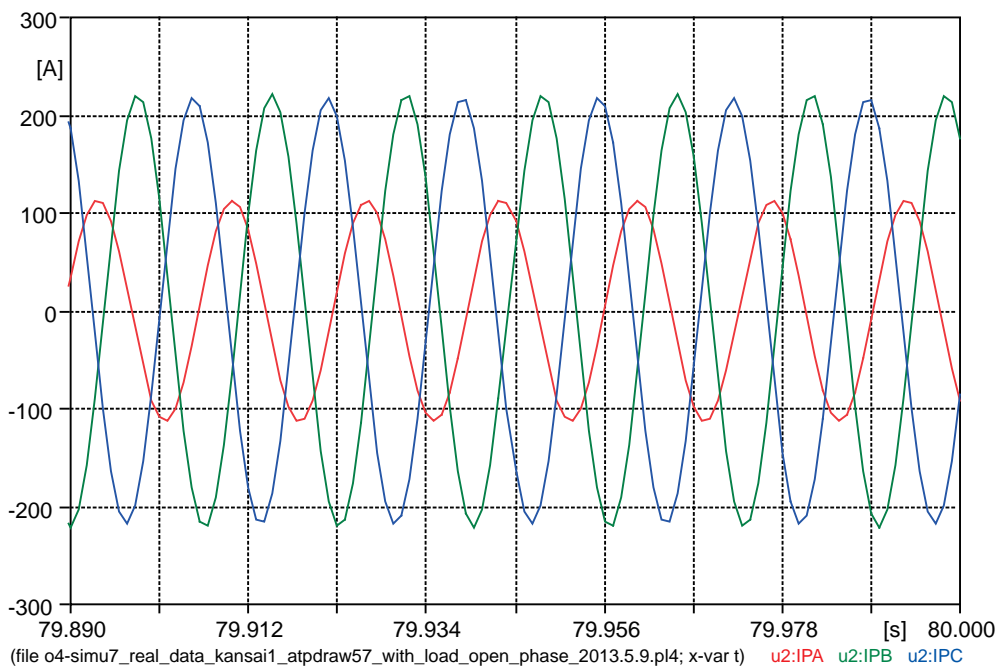


図10 高圧注入ポンプ運転中の電流（一相欠相時）

表4 主要な安全関連負荷の過負荷保護リレー (49), 過電流リレー (51, 50) の動作/不動作の評価結果

機 器	定格電流	変流比	49の動作値/時間	51の動作値/時間	50の動作値/時間	A相の電流/位相	B相の電流/位相	C相の電流/位相	49の動作/不動作	51の動作/不動作	50の動作/不動作
海水ポンプ	105A	150/5	115.5A/48S	157.5A/10S	1650A/瞬時	65.5A ∠-122.1°	122.3A ∠134.8°	124.8A ∠-14.5°	動作	不動作	不動作
高圧注入ポンプ	145A	250/5	159.5A/48S	217.5A/12S	2000A/瞬時	79.3A ∠-120.1°	154.6A ∠135.8°	155.5A ∠-14.5°	不動作	不動作	不動作
余熱除去ポンプ	42A	75/5	46.2A/48S	63A/12S	675A/瞬時	11.2A ∠-131.2°	35.1A ∠138.9°	36.8A ∠-23.5°	不動作	不動作	不動作
格納容器スプレイポンプ	95A	150/5	104.5A/48S	153.6A/12S	1350A/瞬時	50.8A ∠-115.3°	104.1A ∠139.1°	102.8A ∠-12.4°	不動作	不動作	不動作
原子炉補機冷却水ポンプ	39A	60/5	42.9A/48S	59.4A/12S	480A/瞬時	26.7A ∠-130.2°	43.1A ∠129.4°	46.4A ∠-16.1°	動作	不動作	不動作
電動補助給水ポンプ	68A	100/5	74.8A/48S	102A/12S	1100A/瞬時	43.7A ∠-119.5°	82.9A ∠137.4°	84.5A ∠-12.3°	動作	不動作	不動作

5. まとめ

- ① 変圧器のYおよびΔ結線の単純な組合せを全て、およびY-Y結線にΔの安定巻線を加えた場合をシミュレーションで確認した。その結果、外電側（入力）Y、負荷側（出力）Δ（3脚、5脚、単相変圧器×3）の場合、外電側（入力）Y、負荷側（出力）Y（3脚）の場合および外電側Y、負荷側Y+Δの安定巻線（3脚、5脚）の場合は、電圧の変化による地絡のない一相開放（欠相）を検出することはできないことがわかった。
- ② Yg-Δ, Yg-Yg+Δの安定巻線およびYg-Yg（3脚）変圧器の一次側が地絡のない一相欠相（開放）をした場合に電圧が再生される理論的根拠を示した。
- ③ 国内代表プラントの安全関連の機器に電源を供給する変圧器外電側（入力側）の地絡のない一相欠相の状況において、安全注入信号が発信し、ECCSなど安全関連負荷が順次起動した場合の変圧器および安全関連負荷の応答をシミュレーションした。その結果に基づいて、動作する可能性が有る低電圧保護リレー（27）、比率差動保護リレー（87）、過電流保護リレー（51）、中性点過電流保護リレー（51G）、中性点過電圧保護リレー（64E）の動作/不動作を定量的に評価した。その結果、変圧器一次側の中性点過電流保護リレー（51G）のみ動作することがわかった。
- ④ また、国内代表プラントのECCS関連負荷、海水ポンプ、機器冷却水ポンプなど安全関連負荷の過負荷保護リレー（49）、過電流リレー（51, 50）の動作/不動作を定量的に評価した。その結

果、海水ポンプ、原子炉補機冷却水ポンプ、電動補助給水ポンプの49リレーのみ動作することがわかった。

参考文献

- (1) NRC BULLETIN 2012-01, DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM.
- (2) NRC INFORMATION NOTICE 2012-03, DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM.
- (3) A Practical Guide for Detecting Single-Phasing on a Three-Phase Power System by John Horak and Gerald F. Johnson, Basler Electric Company.
- (4) 嶋田 善夫, 「原子力発電所の非常用所内電源系統の外部電源変圧器の一相欠相時のEMTPによる応答解析」, INSS JOURNAL, Vol.20, P204 (2013).
- (5) Meyer, W.S., et al Editors "EMTP Rule Book" Portland, Oregon, Revised 1992. Bonneville Power Administration, System Engineering, 1980.
- (6) Amir Norouzi, "Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm," GE Digital Energy Markham, ON, 2013.