

# 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

Transient evaluation using EMTP at one phase opening of the offsite power transformer of the emergency power supply systems for nuclear power plants

嶋田 善夫 (Yoshio Shimada)\*<sup>1</sup>

**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。本研究は、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外部電源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、EMTP 電気過渡応答解析コードによるシミュレーションを用いて明確に特定した。

**キーワード** 非常用電源系統, 三相変圧器, 欠相, NRC, EMTP

**Abstract** The emergency power supply systems of nuclear power plants for the object of this research are critical to supply stable electric power to such systems as the emergency core cooling system (ECCS), and to maintain the safety of the nuclear power reactor; this was apparent from the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. USNRC issued regulatory documents (BL 2012-01, IN 2012-03), and has commenced to review the problem which cannot be detected by degraded-voltage protection relays such as new design vulnerability of the power supply systems that are certain kind of winding structures and iron core structures when the one phase open fault occurred 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 load side is a delta connection etc. This research used simulation by the electro-magnetic transients program (EMTP) and obtained findings that clearly specified the response at the time of 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 issue for the response of emergency power supply systems and the safety related components of representative domestic PWR plants when one phase open fault occurred without ground fault.

**Keywords** emergency power supply system, three phase transformer, open phase, NRC, EMTP

## 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」<sup>(1)</sup> および「NRC INFORMATION

NOTICE 2012-03: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM」<sup>(2)</sup> 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、事業者へ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は、Y

\* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

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。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」<sup>(3)</sup>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。

原子力安全システム研究所は、ECCSなどの安全関連負荷が順次起動した場合の非常用ディーゼル発電機の電圧、周波数の過渡応答解析<sup>(4)</sup>を、また外部電源の電圧変動がECCSなどの安全関連負荷に与える影響解析を、EMTP<sup>(5)</sup>電気過渡解析プログラムを使用し、過去に実施した実績がある。

本研究の目的は、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、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）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することである。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する。

最後に、以上の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す。

## 2. EMTPによる三相変圧器の一相開放のシミュレーション結果と考察

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、単相変圧器を外側でY結線およびΔ結線した場合、変圧器の鉄心が3-leg stacked, 5-leg stacked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以下に示す。

(1) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_1（図1）

変圧器の結線が外電側Y、負荷側Δで、地絡のない一相欠相（開放）をした場合に、欠相を検出できない可能性があるため、以下の条件によるシミュレーションの結果と考察を示す。国内PWR発電所の主変圧器を受電用に使用した場合（主変圧器は送電時と受電時で、電源の方向が変わる）および動力用変圧器は、この結線に該当する。

(a) シミュレーションの条件：

変圧器の結線⇒外電側Y（直接接地）、負荷側Δ（非接地）

変圧器の鉄心⇒3-leg stacked

変圧器のモデル⇒EMTPのハイブリッド変圧器

負荷⇒無負荷

欠相⇒0.5秒でA相が欠相

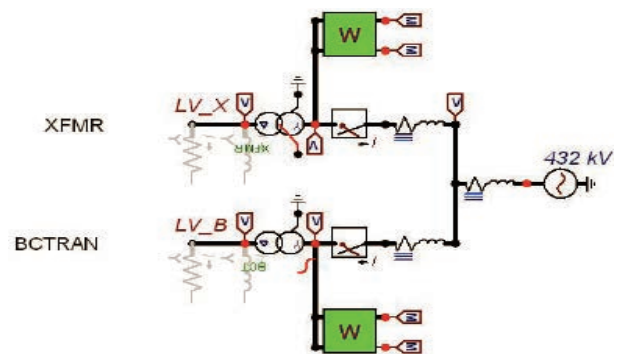


図1 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図2、図3は、それぞれ変圧器外電側、負荷側の相間電圧を示し、A相欠相時点の前後の時間において、電圧の変化が全くない。図4は、変圧器外電側の各相の無負荷励磁電流を示し、A相欠相時点から、A相電流は0(A)、健全な2相の電流は増加する。また、変圧器鉄心の非線形な励磁特性により、電流波形は大きく歪む。

(c) 考察

図2、3のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできない。図4のとおり電流の変化はあるが、無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは、困難と思われる。

(2) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_2（図5）

シミュレーション例\_2は、シミュレーション例\_1と同じ条件で、50%の静止型負荷（145MVA（力率

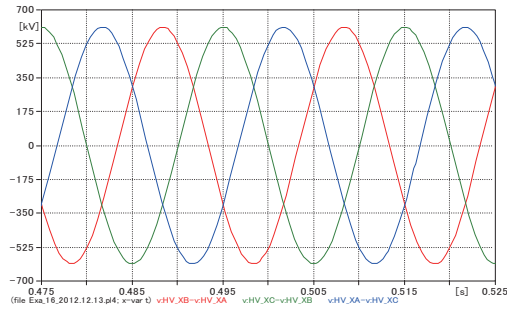


図2 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

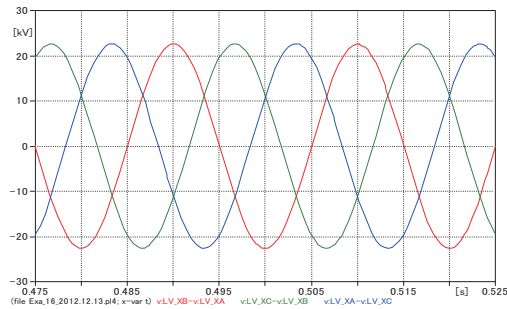


図3 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

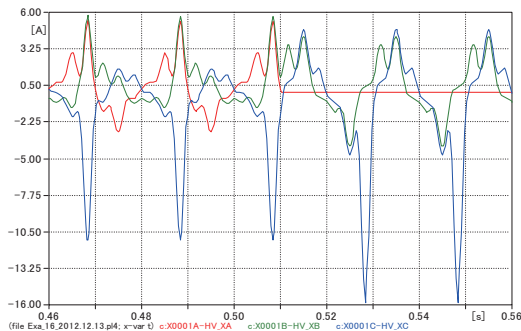


図4 変圧器外電側（入力側）の相電流

0.8)) を加えた場合のシミュレーション結果と考察を示す。

(a) シミュレーションの条件：

変圧器の結線⇒外電側 Y (直接接地), 負荷側 Δ (非接地)

変圧器の鉄心⇒3-leg stacked

変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器

負荷⇒50%負荷 (145MVA (力率0.8))

欠相⇒0.5秒でA相が欠相

(b) シミュレーションの結果

図6, 図7は, それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相

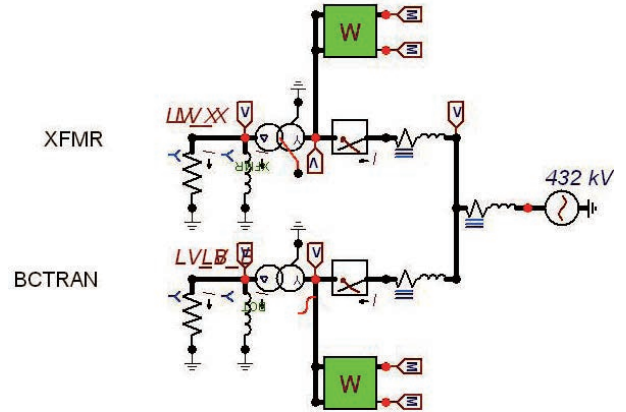


図5 単線結線図

間電圧を示し, A相欠相時点から, 10%程度の電圧低下が見られる。図8は, 変圧器外電側の各相の電流を示し, A相欠相時点から, 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9は, 変圧器負荷側の各相の電流を示し, 静止型の負荷であるため, 各相電圧と線形関係にある電流が流れる。

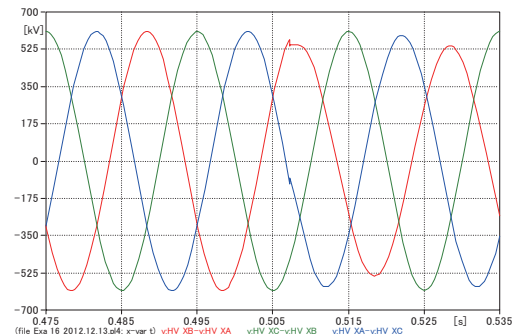


図6 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

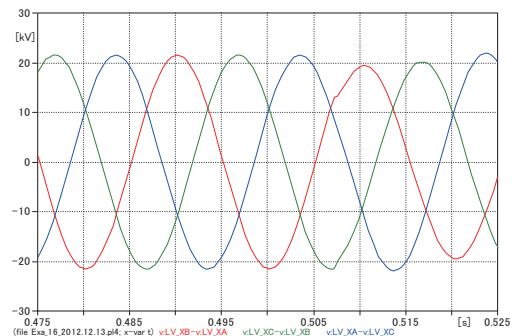


図7 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

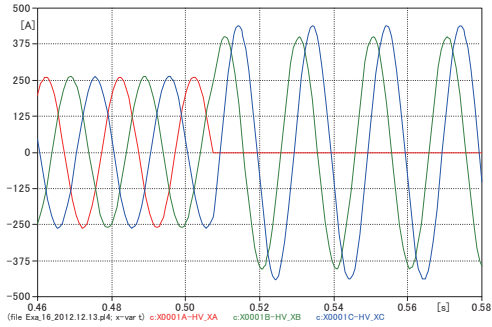


図8 変圧器外電側（入力側）の相電流

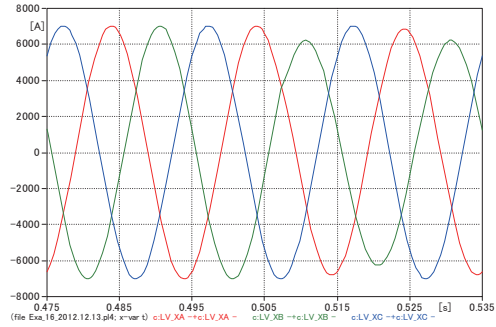


図9 変圧器負荷側（出力側）の相電流

(c) 考察

図6, 7のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することは困難である。図8のとおり外電側（入力側）の相電流で検出できる。

(3) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_3 (図10)

シミュレーション例\_3は、シミュレーション例\_1および例\_2によって、一相欠相の検出が困難な事が確認できた外電側 Y, 負荷側 Δ の結線を、単相変圧器3台により構成し、以下の条件によるシミュレーションの結果と考察を示す。国内 PWR 発電所の使用例

はないが、全ての巻線の組み合わせを網羅するために結果を示す。

(a) シミュレーションの条件：

- 変圧器の結線⇒外電側 Y（直接接地）、負荷側 Δ（非接地）
- 変圧器の構成⇒単相変圧器×3
- 変圧器のモデル⇒EMTP の BCTRAN 変圧器
- 負荷⇒無負荷
- 欠相⇒0.5秒で A 相が欠相

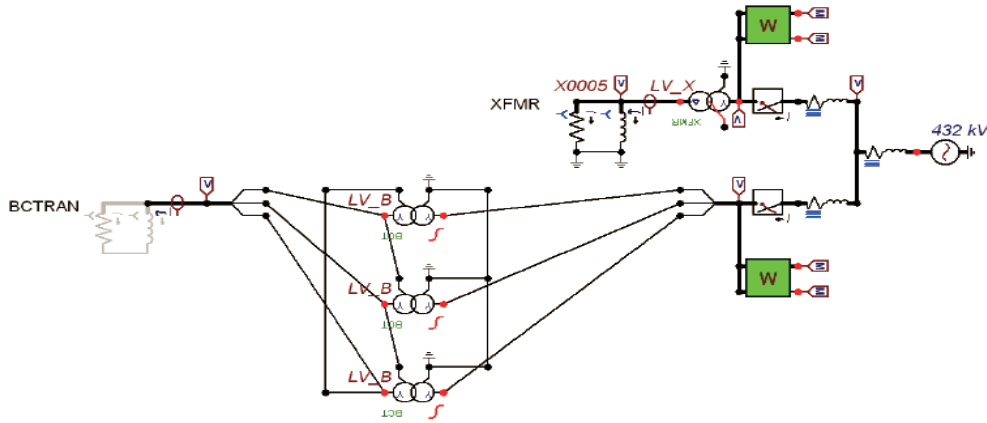


図10 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図11, 図12は、それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相間電圧を示し、A相欠相時点の前後の時間において、電圧の変化が全くない。図13は、変圧器外電側の各相の電流を示し、A相欠相時点から、A相電流は0(A)、健全な2相の電流は増加する。また、変圧

器鉄心の非線形な励磁特性により、電流波形は大きく歪む。図14は、負荷側 Δ の循環電流(赤)と外電側 Y の B 相電流(緑)を示し、負荷側 Δ の循環電流(赤)は、欠相前、電源周波数の3倍の150 Hz で歪の少ない波形となり、欠相後、電源周波数と同じ50 Hz、電流値は増加、波形は大きく歪む。

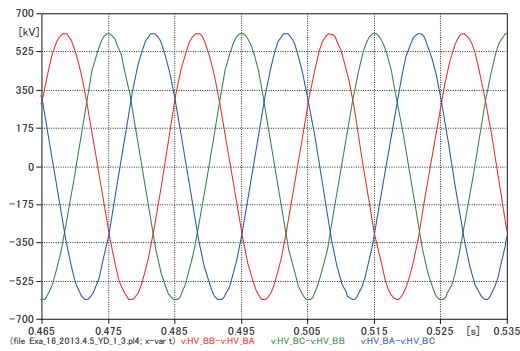


図 11 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

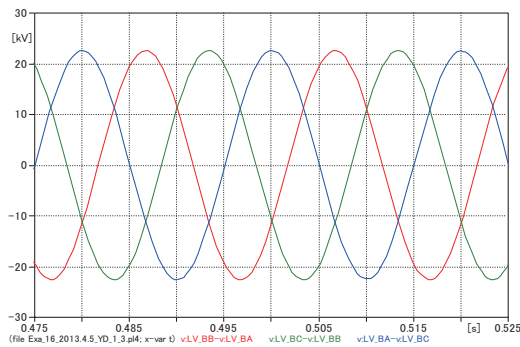


図 12 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

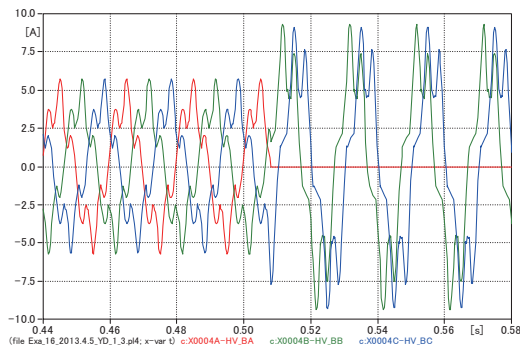


図 13 変圧器外電側（入力側）の相電流

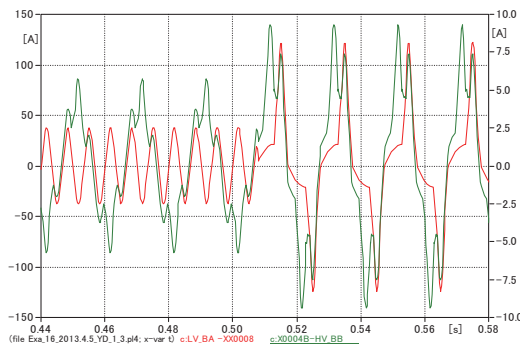


図 14 負荷側△の循環電流(赤-左の軸)と外電側 Y の B 相電流(緑-右の軸)

(c) 考察

図 11, 12 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできない. 図 13 のとおり電流の変化はあるが, 無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは, 困難と思われる. 図 14 は負荷側△の循環電流(赤)と外電側 Y の B 相電流(緑)を比較し, 循環電流(赤)の波形は, 欠相後に周波数, 電流値, 歪が変化する.

(4) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_4 (図 15)

シミュレーション例\_4 は, シミュレーション例\_1~3 の逆方向から励磁した, すなわち電源側△, 負荷側 Y として, 地絡のない一相欠相(開放)をした場合の下記の条件によるシミュレーション結果と考察を示す. この巻線構成は, 国内 PWR 発電所の送電時の主変圧器（主変圧器は送電時と受電時で, 電源の方向が変わる）, 所内変圧器, 予備変圧器が該当する.

(a) シミュレーションの条件：

変圧器の結線⇒外電側△（非接地）, 負荷側 Y（直接接地）

変圧器の鉄心⇒3-leg stacked

変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器

負荷⇒無負荷

欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

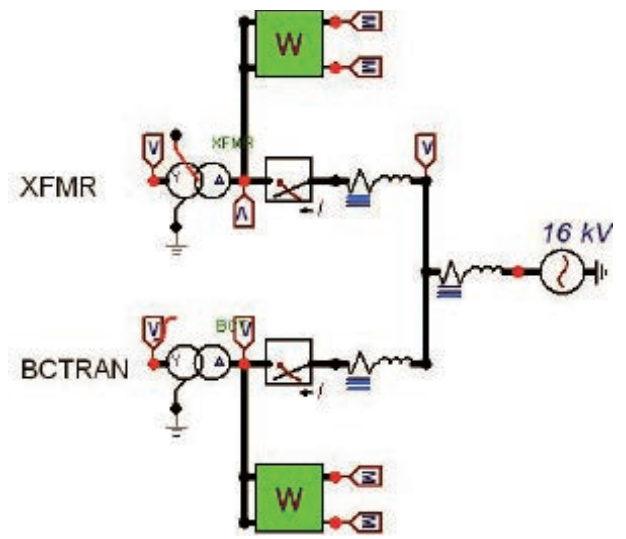


図 15 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 16, 図 17 は, それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相間電圧を示し, A 相欠相時点の前後の時間において, 相間電圧は 50% 程度低下し, 位相も大きく変化する. 図 18 のとおり電流の変化はあるが, 無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは, 困難と思われる.

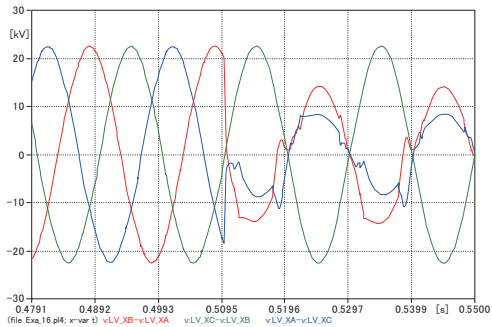


図 16 変圧器外電側 (入力側) の相間電圧

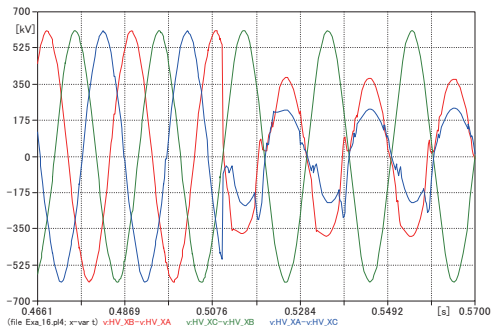


図 17 変圧器負荷側 (出力側) の相間電圧

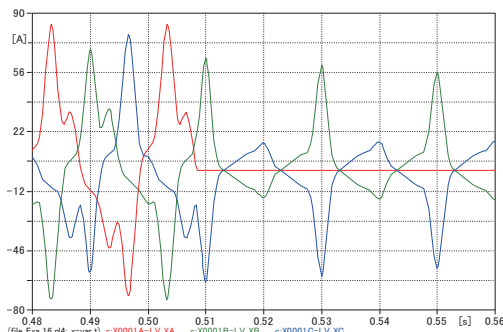


図 18 変圧器外電側 (入力側) の相電流

(c) 考察

図 16, 17 のとおり電圧の変化で一相開放 (欠相) を検出することはできる. 図 18 のとおり電流の変化はあるが, 無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは, 困難と思われる.

(5) 一相開放 (欠相) のシミュレーション例\_5 (図 19)

国内 PWR 発電所の変圧器結線で, 外電側 Y, 負荷側 Y はないが, 全ての巻線の組み合わせを網羅するため, また地絡のない一相欠相 (開放) をした場合に, 欠相を検出できない可能性があるため, 以下の条件によるシミュレーションの結果と考察を示す.

(a) シミュレーションの条件:

- 変圧器の結線⇒外電側 Y (直接接地), 負荷側 Y (直接接地)
- 変圧器の鉄心⇒3-leg stacked
- 変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器
- 負荷⇒無負荷
- 欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

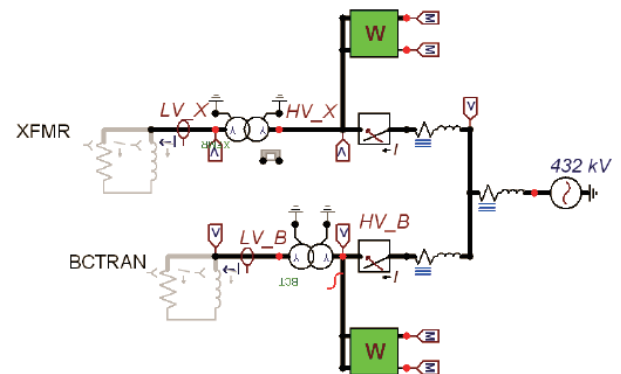


図 19 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 20, 図 21 は, それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相間電圧を示し, A 相欠相時点の前後の時間において, 電圧の変化が全くない. 図 22 は, 変圧器外電側の各相の無負荷励磁電流を示し, A 相欠相時点から, A 相電流は 0(A), 健全な 2 相の電流は増加する. また, 変圧器鉄心の非線形な励磁特性により, 電流波形は大きく歪む.

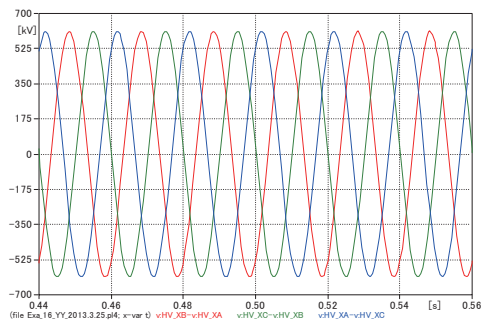


図 20 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

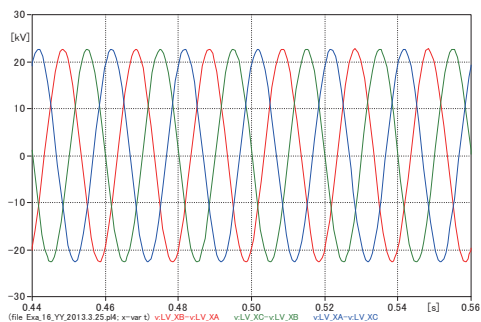


図 21 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

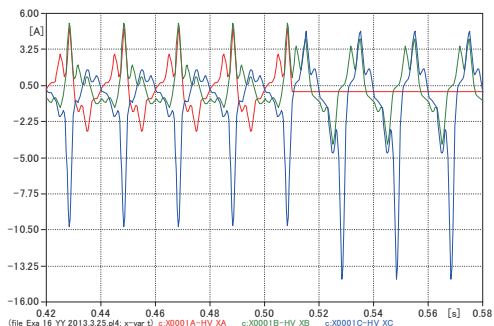


図 22 変圧器外電側（入力側）の相電流

(c) 考察

図 20, 21 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできない。図 22 のとおり電流の変化はあるが、無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取るとは、困難と思われる。

(6) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_6 (図 23)

シミュレーション例\_6 は、シミュレーション例\_5 と同じ条件で、50%の静止型負荷（145MVA（力率 0.8））を加えた場合のシミュレーション結果と考察を示す。

(a) シミュレーションの条件：

変圧器の結線⇒外電側 Y（直接接地）、負荷側 Y（直接接地）

変圧器の鉄心⇒3-leg stacked

変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器

負荷⇒50%負荷（145MVA（力率 0.8））

欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

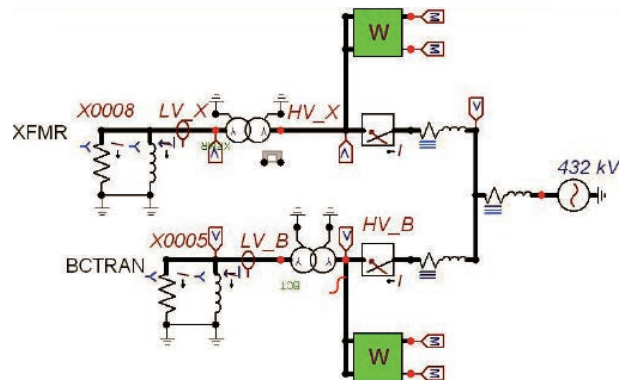


図 23 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 24, 図 25 は、それぞれ変圧器外電側、負荷側の相間電圧を示し、A 相欠相時点から、10%程度の電圧低下が見られる。図 26 は、変圧器外電側の各相の電流を示し、A 相欠相時点から、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 27 は、変圧器負荷側の各相の電流を示し、静止型の負荷であるため、各相電圧と線形関係にある電流が流れる。

(c) 考察

図 24, 25 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することは困難である。図 26 のとおり外電側（入力側）の相電流で検出できる。

(7) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_7 (図 28)

例\_5 と同様に変圧器結線は、外電側 Y、負荷側 Y であるが、変圧器の鉄心を 5-leg stacked とした場合のシミュレーションの結果と考察を示す。

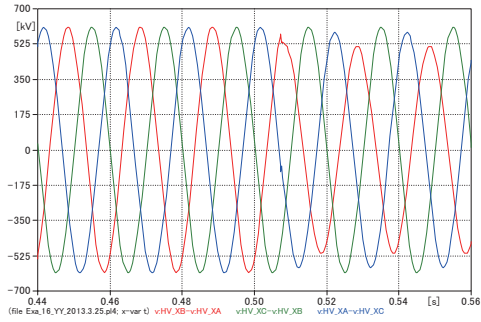


図 24 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

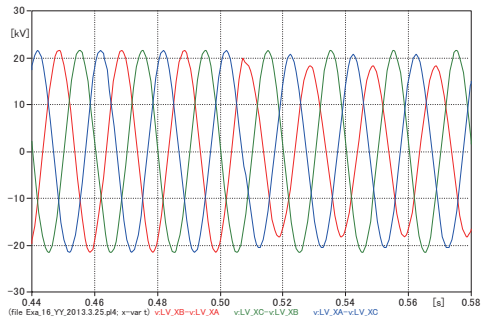


図 25 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

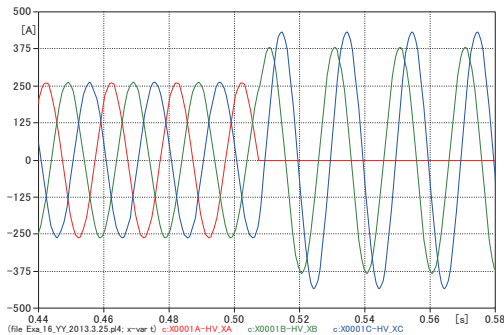


図 26 変圧器外電側（入力側）の相電流

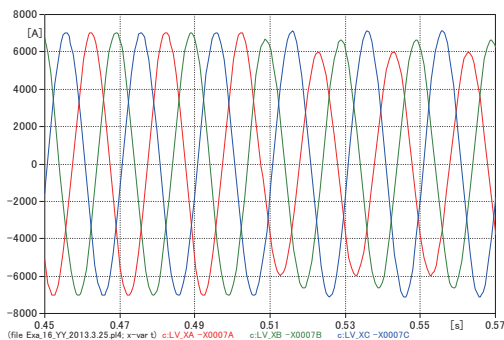


図 27 変圧器負荷側（出力側）の相電流

(a) シミュレーションの条件：

変圧器の結線⇒外電側 Y（直接接地），負荷側 Y（直接接地）

変圧器の鉄心⇒5-leg stacked

変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器

負荷⇒無負荷

欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

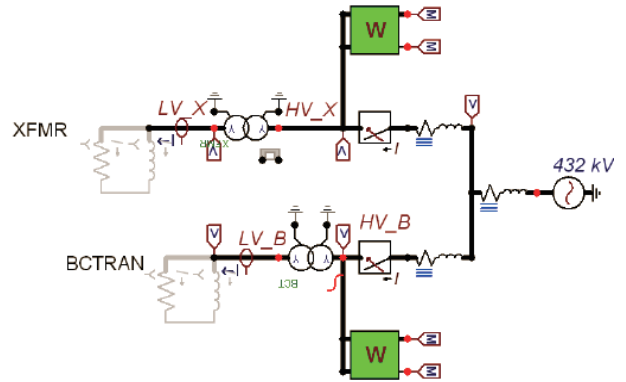


図 28 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

例\_5 のとおり，外電側 Y，負荷側 Y で変圧器の鉄心が 3-leg stacked の場合，欠相を電圧の変化で検出できなかった，一方，同じ巻線構成でも 5-leg stacked の場合，図 29，図 30 に示すように，それぞれ変圧器外電側，負荷側の相間電圧は，A 相欠相時点から，70% 程度低下する．図 31 のとおり電流の変化はあるが，無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは，困難と思われる．

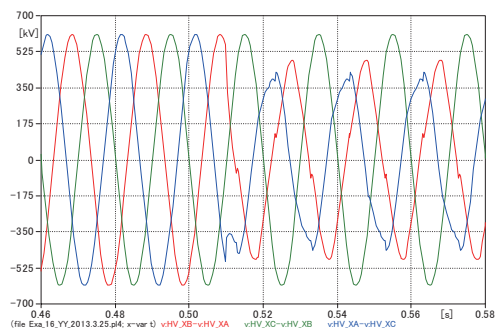


図 29 変圧器外電側（入力側）の相間電圧



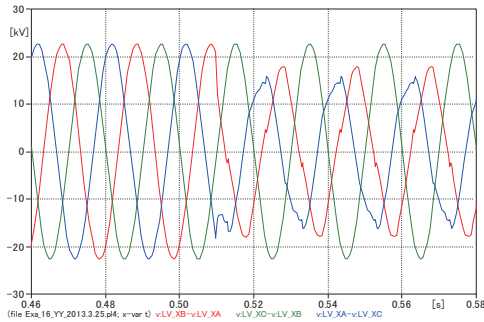


図 30 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

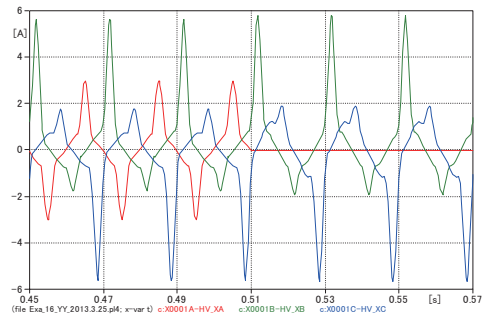


図 31 変圧器外電側（入力側）の相電流

(c) 考察

図 29, 30 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできる．図 31 のとおり電流の変化はあるが，無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは，困難と思われる．

(8) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_8（図 32）

例\_5 と同様に変圧器結線は，外電側 Y，負荷側 Y であるが，単相変圧器 3 台を外部で結線した場合のシ

ミュレーションの結果と考察を示す．

(a) シミュレーションの条件：

- 変圧器の結線⇒外電側 Y（直接接地），負荷側 Y（直接接地）
- 変圧器の構成⇒単相変圧器× 3
- 変圧器のモデル⇒EMTP の BCTRAN 変圧器
- 負荷⇒無負荷
- 欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

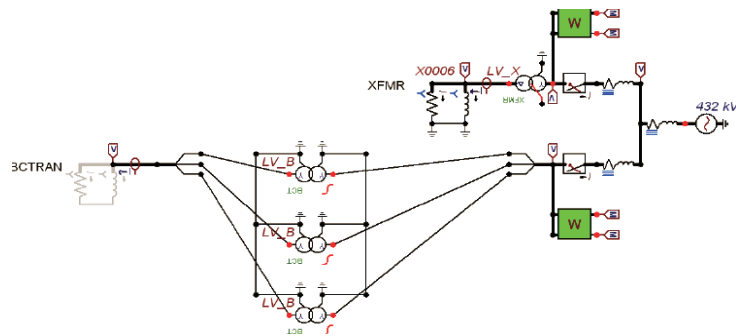


図 32 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

例\_5 のとおり，外電側 Y，負荷側 Y で変圧器の鉄心が 3-leg stacked の場合，欠相を電圧の変化で検出できなかった，一方，同じ巻線構成でも単相変圧器 3 台を外部で結線した場合，図 33, 図 34 に示すように，変圧器外電側，負荷側の相間電圧は，A 相欠相時点から 60%程度低下する．図 35 のとおり電流の変化はあるが，無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは，困難と思われる．

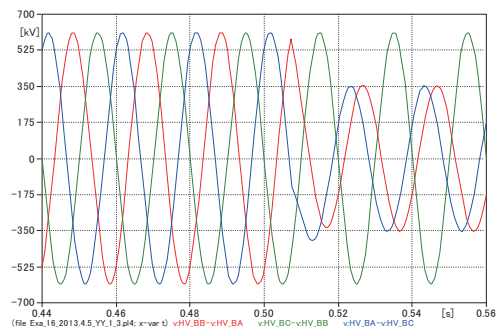


図 33 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

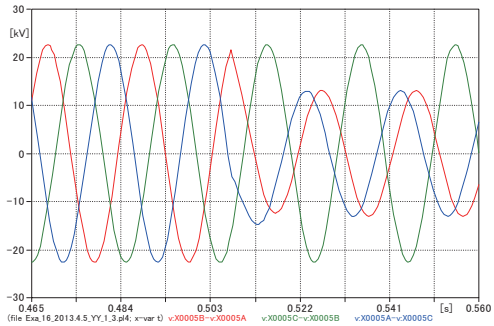


図 34 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

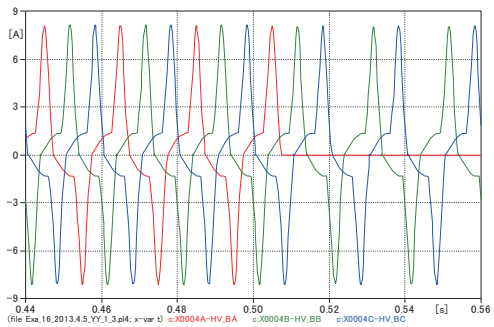


図 35 変圧器外電側（入力側）の相電流

(c) 考察

図 33, 34 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできる。図 35 のとおり電流の変化はあるが、無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは、困難と思われる。

(9) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_9 (図 36)

国内 PWR 発電所の変圧器結線で、外電側  $\Delta$ 、負荷側  $\Delta$  はないが、全ての巻線の組み合わせを網羅するため、以下の条件によるシミュレーションの結果と考察を示す。

(a) シミュレーションの条件：

- 変圧器の結線⇒外電側  $\Delta$ （非接地）、負荷側  $\Delta$ （非接地）
- 変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器
- 負荷⇒無負荷
- 欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

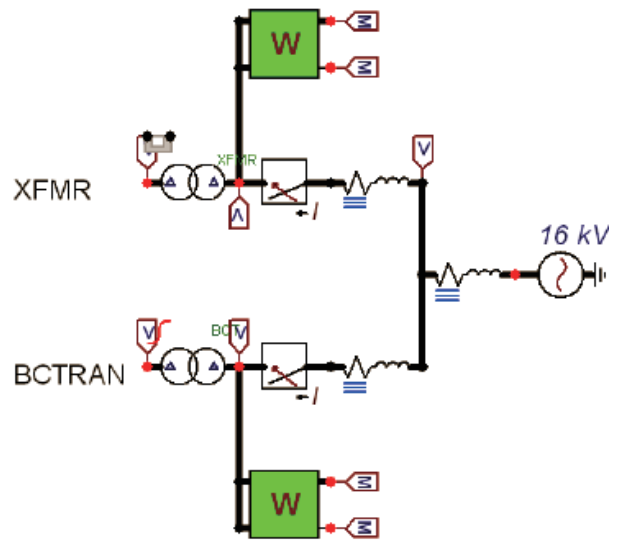


図 36 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 37, 図 38 は、それぞれ変圧器外電側、負荷側の相間電圧を示し、A 相欠相時点から、相間電圧は 50% 程度低下し、位相も大きく変化する。図 39 のとおり電流の変化はあるが、無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは、困難と思われる。

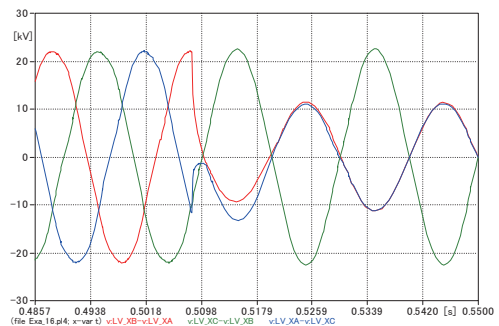


図 37 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

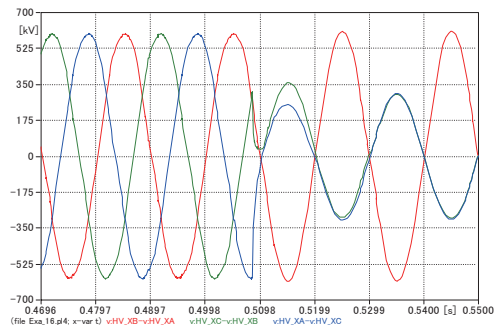


図 38 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

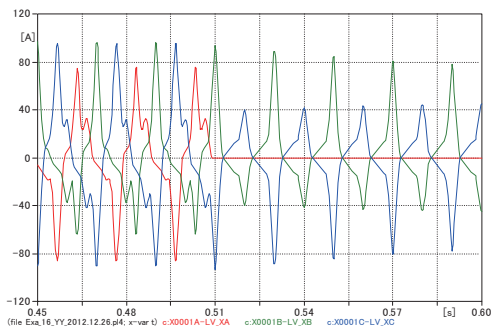


図 39 変圧器外電側（入力側）の相電流

(c) 考察

図 37, 38 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできる。図 39 のとおり電流の変化はあるが、無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取るとは、困難と思われる。

(10) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_10 (図 40)

非常用電源系統に電源を供給する国内 PWR 発電所の起動変圧器、一部の予備変圧器は、変圧器の結線が外電側 Y、負荷側 Y + Δ の安定巻線のものがある。地絡のない一相欠相（開放）をした場合に、欠相を検出できない可能性がある。以下の条件によるシミュレーションの結果と考察を示す。

(a) シミュレーションの条件：

- 変圧器の結線⇒外電側 Y（直接接地）、負荷側 Y（直接接地） + Δ の安定巻線
- 変圧器の鉄心⇒ 3-leg stacked
- 変圧器のモデル⇒ EMTP のハイブリッド変圧器
- 負荷⇒無負荷
- 欠相⇒ 0.5 秒で A 相が欠相

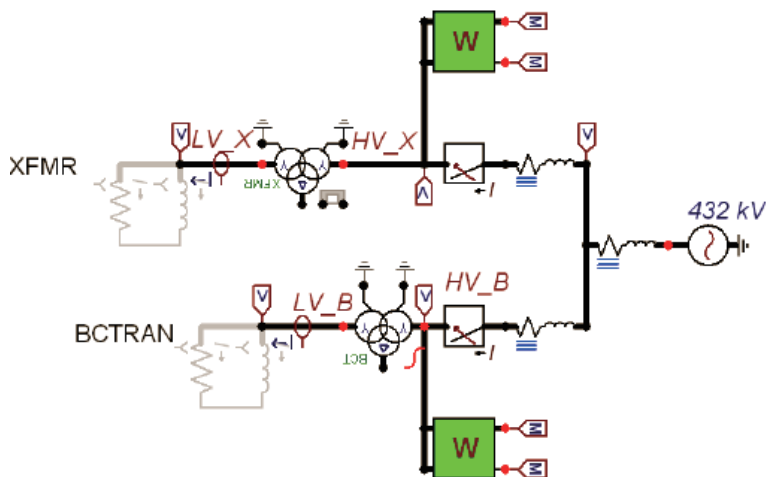


図 40 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 41, 図 42 は、それぞれ変圧器外電側、負荷側の相間電圧を示し、A 相欠相時点の前後において、電圧の変化が全くない。図 43 は、変圧器外電側の各相の無負荷励磁電流を示し、A 相欠相時点から、A 相電流は 0(A)、健全な 2 相の電流は増加する。また、変圧器鉄心の非線形な励磁特性により、電流波形は大きく歪む。

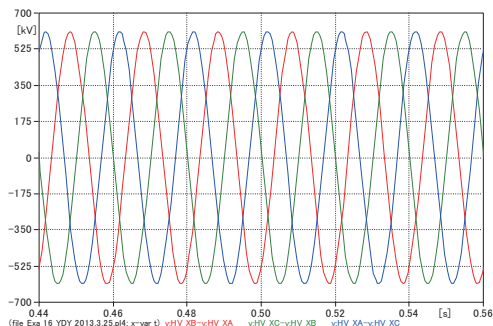


図 41 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

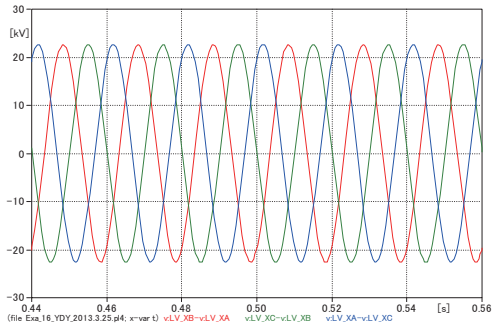


図 42 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

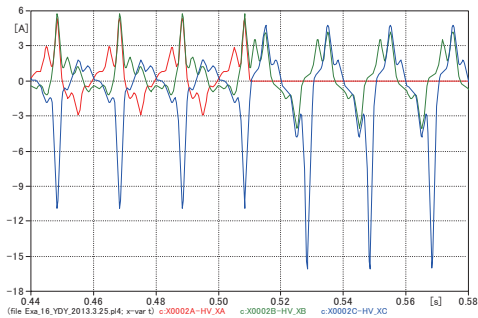


図 43 変圧器外電側（入力側）の相電流

(c) 考察

図 41, 42 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできない. 図 43 のとおり電流の変化はあるが, 無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは, 困難と思われる. また, 波形は外電側 Y, 負荷側 Y の場合と同じである.

(11) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_11 (図 44)

シミュレーション例\_11 は, シミュレーション例\_10 と同じ条件で, 50%の静止型負荷 (145MVA (力率0.8)) を加えた場合のシミュレーションの結果と考察を示す.

(a) シミュレーションの条件:

- 変圧器の結線⇒外電側 Y (直接接地), 負荷側 Y (直接接地) + Δの安定巻線
- 変圧器の鉄心⇒3-leg stacked
- 変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器
- 負荷⇒50%負荷 (145MVA (力率0.8))
- 欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

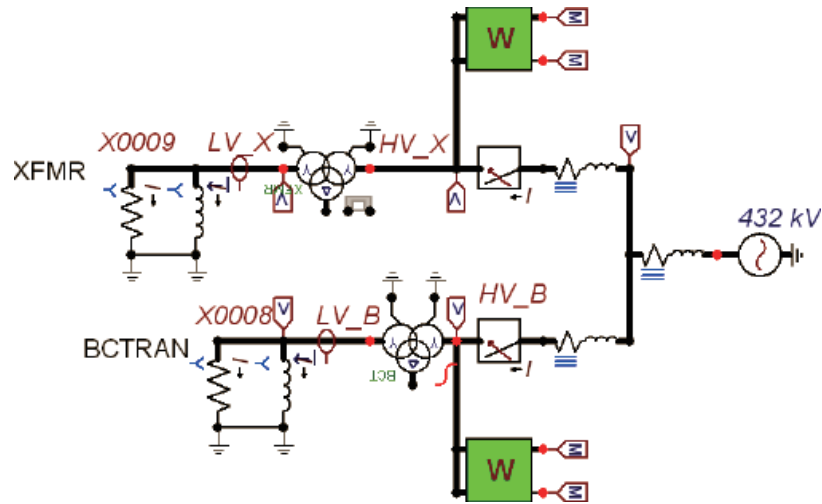


図 44 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 45, 図 46 は, それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相間電圧を示し, A 相欠相時点の前後において, 電圧低下は, ほとんど見られない. 図 47 は, 変圧器外電側の各相の電流を示し, A 相欠相時点から, 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 48 は, 変圧器負荷側の各相の電流を示し,

静止型の負荷であるため, 各相電圧と線形関係にある電流が流れる.

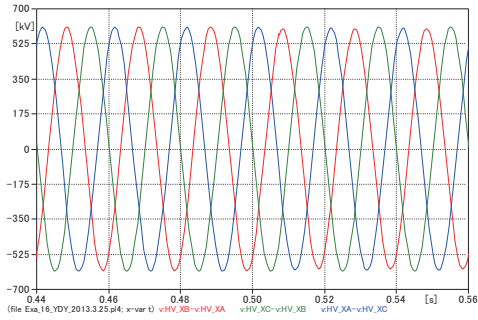


図 45 変圧器外電側（入力側）の相間電圧

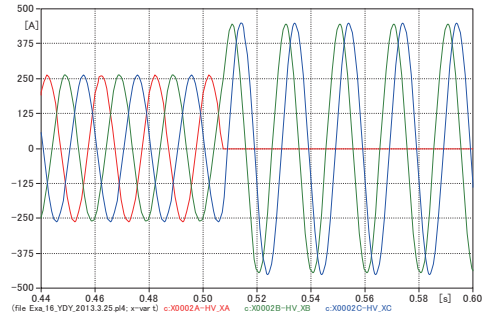


図 47 変圧器外電側（入力側）の相電流

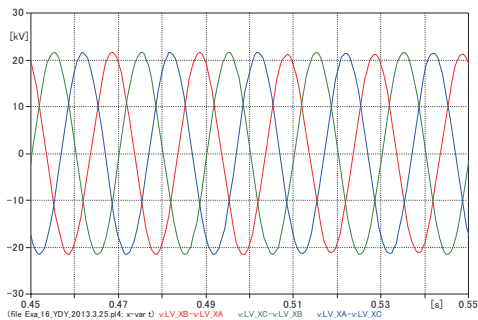


図 46 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧

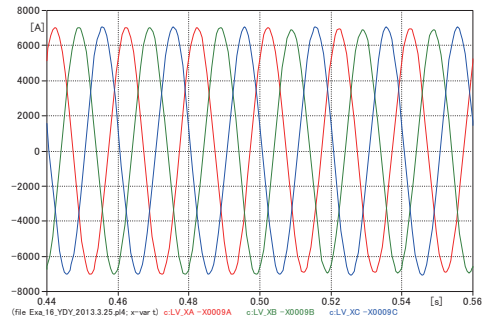


図 48 変圧器負荷側（出力側）の相電流

(c) 考察

図 45, 46 のとおり電圧の変化で一相開放（欠相）を検出することはできない. 図 47 のとおり外電側（入力側）の相電流で検出できる.

(12) 一相開放（欠相）のシミュレーション例\_12 (図 49)

例\_10 と同様に変圧器結線は、外電側 Y、負荷側 Y + Δであるが、変圧器の鉄心を 5-leg stacked とした

場合のシミュレーションの結果と考察を示す.

(a) シミュレーションの条件：

- 変圧器の結線⇒外電側 Y（直接接地）、負荷側 Y（直接接地） + Δの安定巻線
- 変圧器の鉄心⇒5-leg stacked
- 変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器
- 負荷⇒無負荷
- 欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

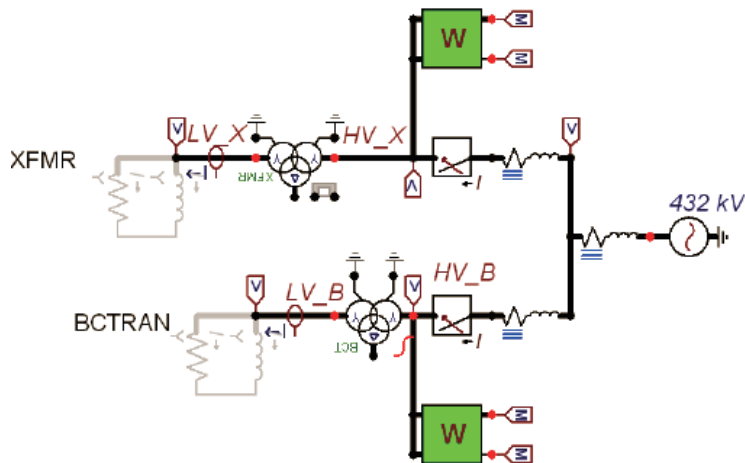


図 49 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 50, 図 51 は, それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相間電圧を示し, A 相欠相時点の前後において, 電圧の変化が全くない. 図 52 は, 変圧器外電側の各相の無負荷励磁電流を示し, A 相欠相時点から, A 相電流は 0(A), 健全な 2 相の電流は増加する. また, 変圧器鉄心の非線形な励磁特性により, 電流波形は大きく歪む.

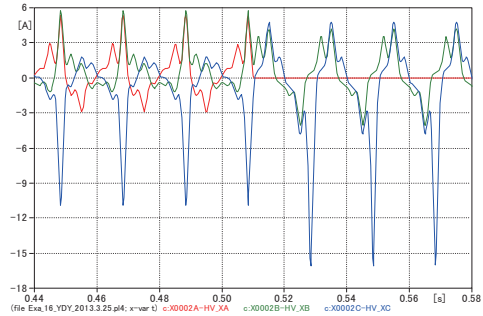


図 52 変圧器外電側 (入力側) の相電流

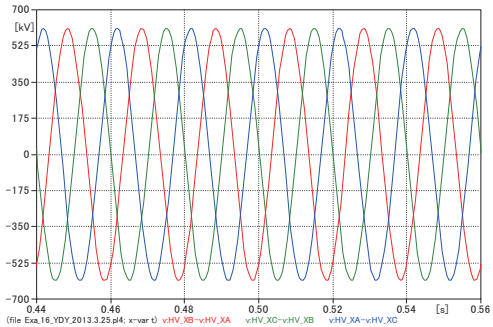


図 50 変圧器外電側 (入力側) の相間電圧

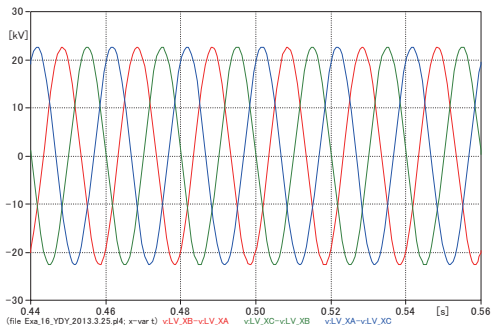


図 51 変圧器負荷側 (出力側) の相間電圧

(c) 考察

図 50, 51 のとおり電圧の変化で一相開放 (欠相) を検出することはできない. 図 52 のとおり電流の変化はあるが, 無負荷励磁電流の微小な変化を電流計から読み取ることは, 困難と思われる. また, 波形は外電側 Y, 負荷側 Y の場合と同じである.

(13) 一相開放 (欠相) のシミュレーション例\_13 (図 53)

シミュレーション例\_13 は, シミュレーション例\_12 と同じ条件で, 50% の静止型負荷 (145MVA (力率 0.8)) を加えた場合のシミュレーション結果と考察を示す.

(a) シミュレーションの条件:

- 変圧器の結線⇒外電側 Y (直接接地), 負荷側 Y (直接接地) + Δの安定巻線
- 変圧器の鉄心⇒5-leg stacked
- 変圧器のモデル⇒EMTP のハイブリッド変圧器
- 負荷⇒50%負荷 (145MVA (力率 0.8))
- 欠相⇒0.5 秒で A 相が欠相

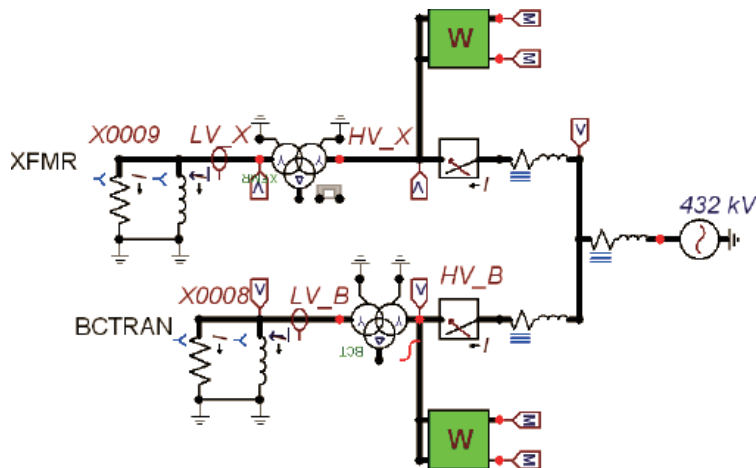


図 53 単線結線図

## (b) シミュレーションの結果

図 54, 図 55 は, それぞれ変圧器外電側, 負荷側の相間電圧を示し, A 相欠相時点から, 10%程度の電圧低下が見られる. 図 56 は, 変圧器外電側の各相の電流を示し, A 相欠相時点から, 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 57 は, 変圧器負荷側の各相の電流を示し, 静止型の負荷であるため, 各相電圧と線形関係にある電流が流れる.

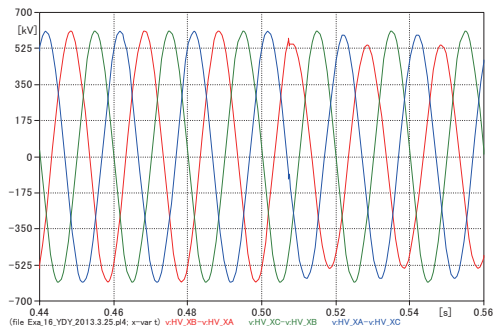


図 54 変圧器外電側 (入力側) の相間電圧

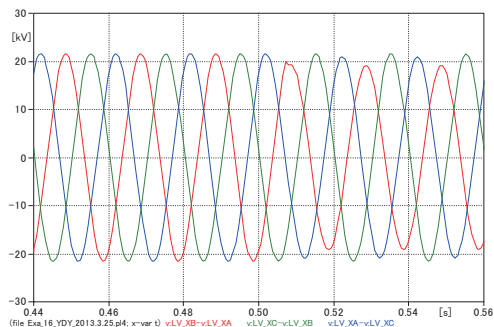


図 55 変圧器負荷側 (出力側) の相間電圧

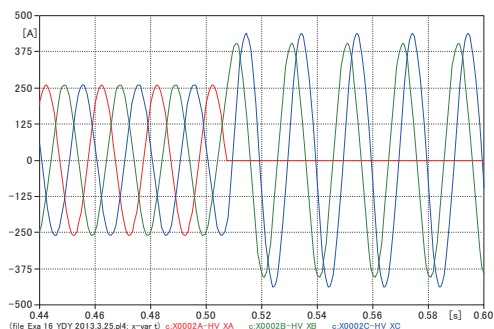


図 56 変圧器外電側 (入力側) の相電流

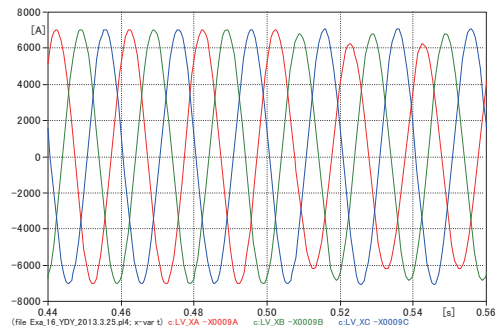


図 57 変圧器負荷側 (出力側) の相電流

## (c) 考察

図 54, 55 のとおり電圧の変化で一相開放 (欠相) を検出することはできない. 図 56 のとおり外電側 (入力側) の相電流で検出できる.

(14) 国内代表プラントの変圧器一相開放 (欠相) の安全注入負荷投入シミュレーション例\_14 (図 58)

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.

(a) 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-leg stacked

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(180 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

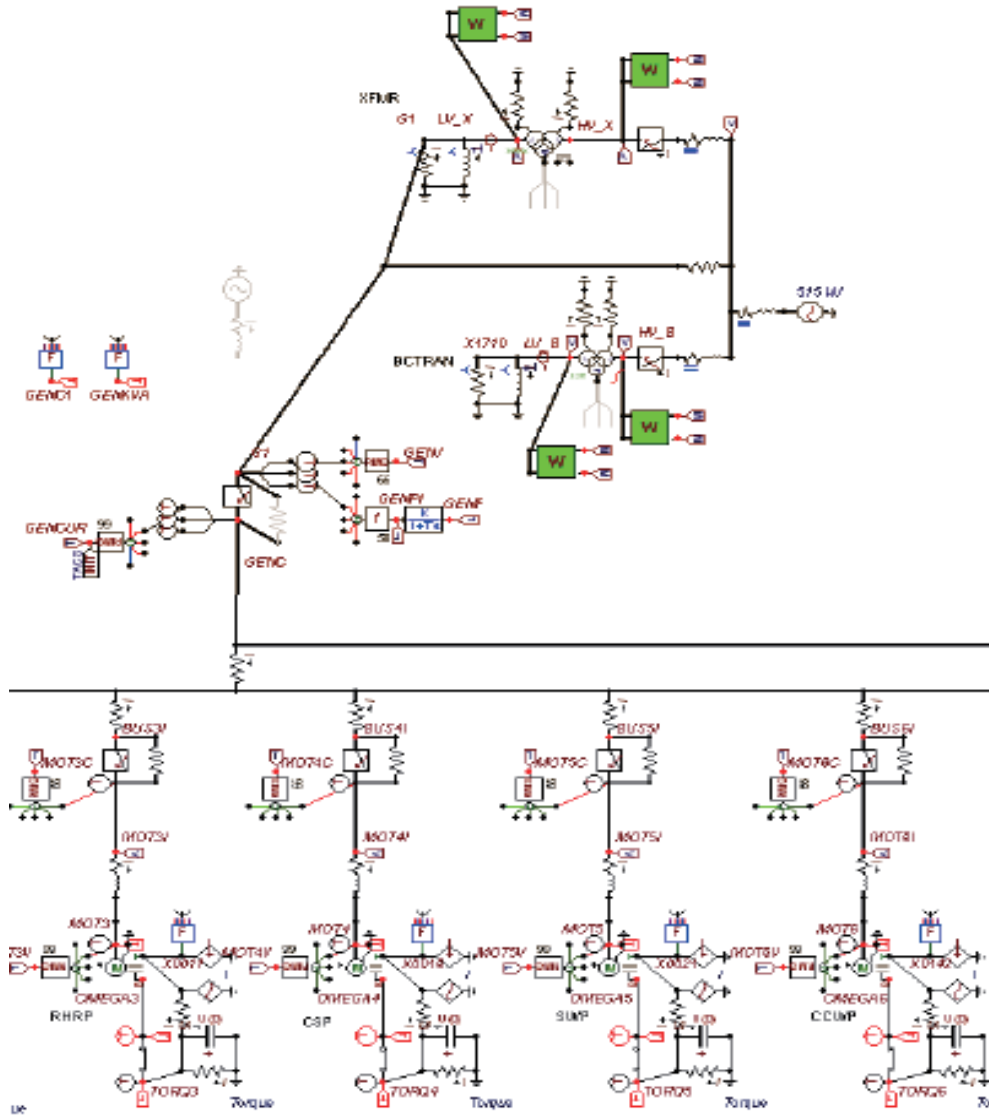


図 58 単線結線図

(b) シミュレーションの結果

図 59, 60 は、それぞれ全負荷投入完了時の外電側および負荷側の相間電圧を示し、一相欠相しているにもかかわらず、10%程度の電圧低下である。図 61 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 62 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、すなわち電流の不平衡は、電圧の不平衡より大きくなる。図 63, 64 は、それぞれ 0 秒から全負荷投入完了までの外電側および負荷側の各相および三相合計電力を示す。図 65, 66 は、比較のために、それぞれ欠相なしの 0 秒から全負荷投入完了までの外電側および負荷側の各相と三相合計電力を示す。各相の電力は、完全に平衡しているため

ラフ上で識別できない。図 67, 68 は、それぞれ 0 秒から全負荷投入完了までの外電側および負荷側の中性点電流を示す。なお、欠相がない場合、中性点電流はほとんど流れない。図 69, 70 は、それぞれ欠相ありおよびなしの最大負荷起動時の角速度、トルクを示す。欠相ありの場合、起動時間および回転数は、正常範囲に維持されるが、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。図 71, 72 は、それぞれ欠相ありおよびなしの最大電動機負荷運転中の電流を示す。欠相ありの場合、欠相なしの電流と比較して、健全な二相の電流が 30%程度増加し、欠相した相の電流は 30%程度減少する。



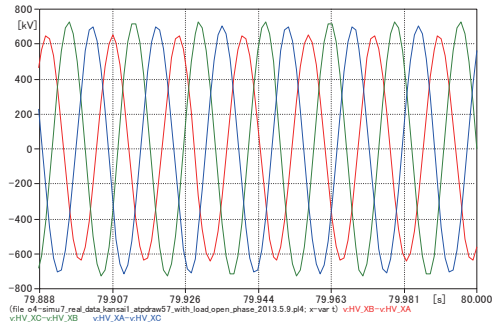


図 59 変圧器外電側（入力側）の相間電圧  
（全負荷投入完了時）

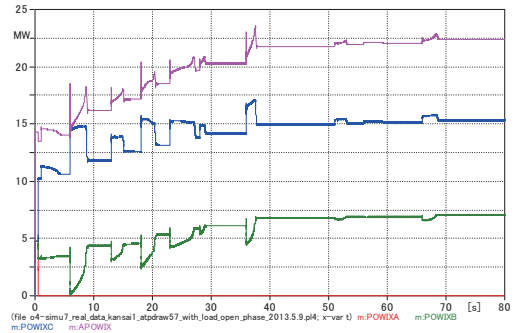


図 63 変圧器外電側（入力側）の各相  
および合計電力

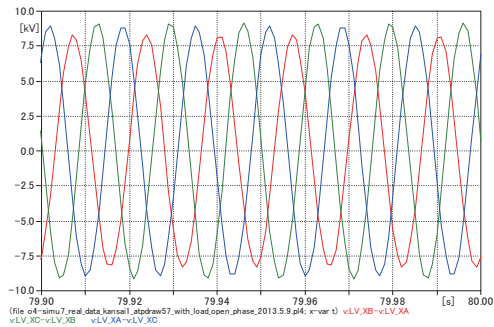


図 60 変圧器負荷側（出力側）の相間電圧  
（全負荷投入完了時）

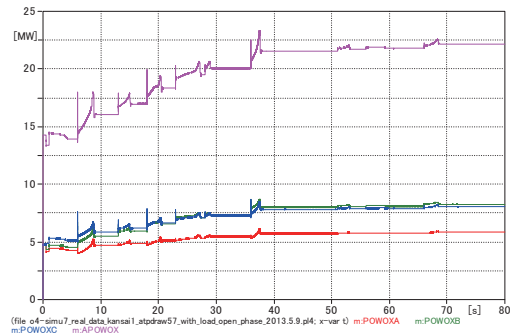


図 64 変圧器負荷側（出力側）の各相  
および合計電力

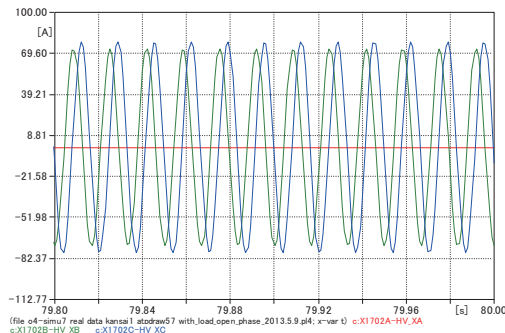


図 61 変圧器外電側（入力側）の相電流  
（全負荷投入完了時）

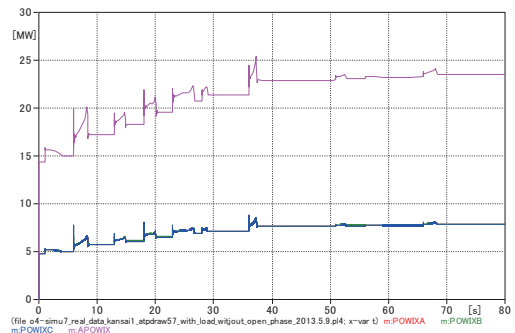


図 65 変圧器外電側（入力側）の各相  
および合計電力  
（欠相なし）

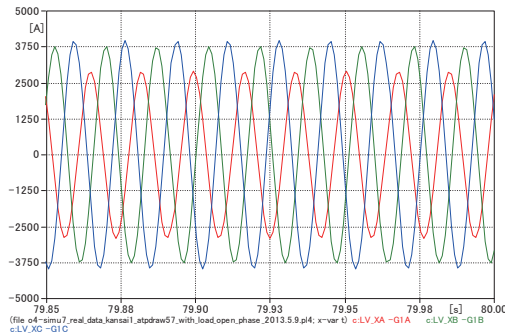


図 62 変圧器負荷側（出力側）の相電流  
（全負荷投入完了時）

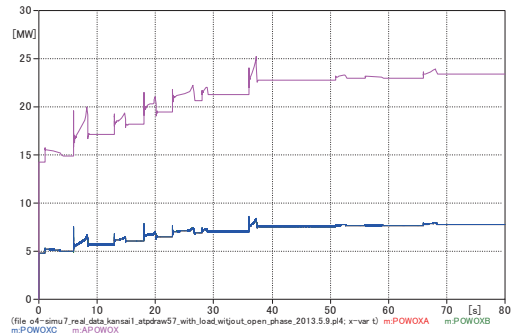


図 66 変圧器負荷側（出力側）の各相  
および合計電力  
（欠相なし）

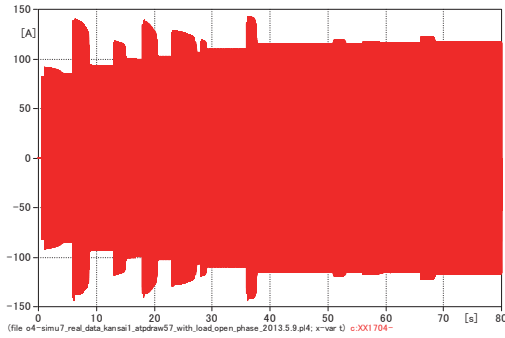


図 67 変圧器外電側（入力側）の中性点電流

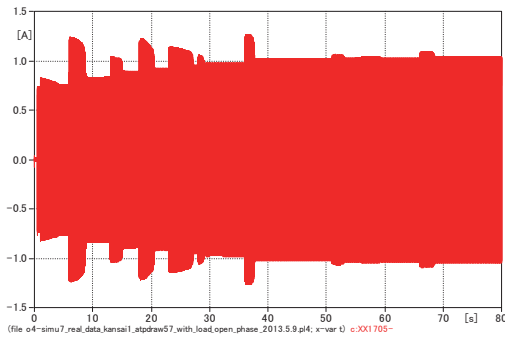


図 68 変圧器負荷側（出力側）の中性点電流

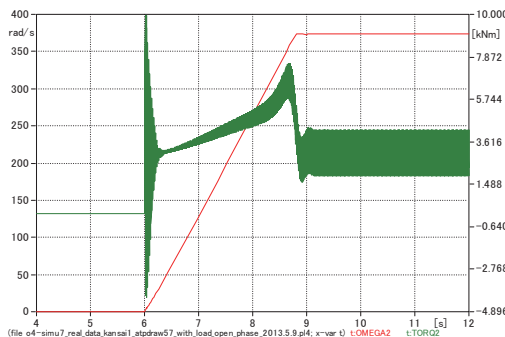


図 69 最大負荷起動時の角速度，トルク  
(欠相あり)

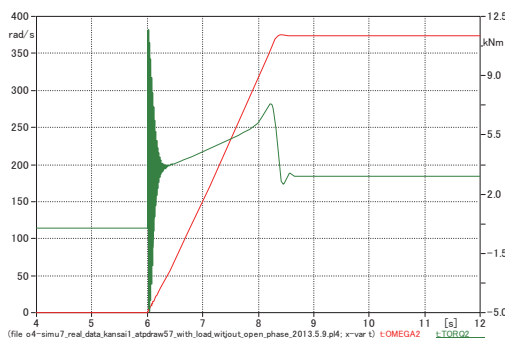


図 70 最大負荷起動時の角速度，トルク  
(欠相なし)

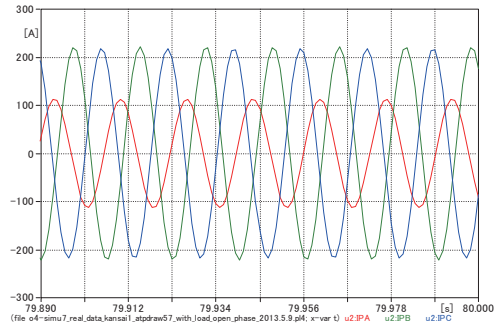


図 71 最大電動機負荷運転中の電流  
(欠相あり)

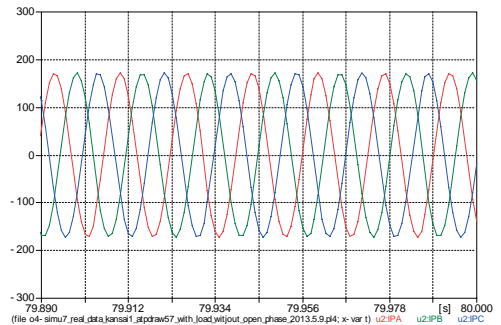


図 72 最大電動機負荷運転中の電流  
(欠相なし)

(c) 考察

- ①図 59, 60 のとおり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図 62 のとおり不均衡が30%程度と大きくなる。さらに、誘導電動機負荷単独では、図 71 のとおり電流の不均衡が50%程度に拡大する。
- ②図 67, 68 のとおり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図 71 のとおり誘導電動機負荷については、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図 69, 70 のとおり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。

<単一故障基準> 非常用炉心冷却系, 安全保護系および電気系など安全上重要な系の設計に当っては機器の単一故障の仮定を加えてもそれらの系の安全機能が損なわれないように設計することが要求されており, これを単一故障基準と呼んでいる。

### 3. まとめ

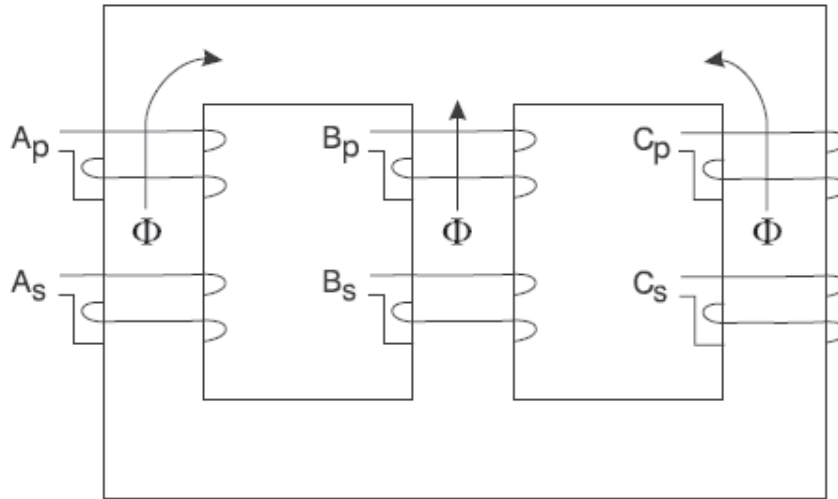
- ①変圧器の Y および  $\Delta$  結線の単純な組合せを全て, および YY 結線に  $\Delta$  の安定巻線を加えた場合をシミュレーションで確認した. その結果, 外電側 (入力) Y, 負荷側 (出力)  $\Delta$  (3-leg stacked, 5-leg stacked, 単相変圧器  $\times$  3) の場合, 外電側 (入力) Y, 負荷側 (出力) Y (3-leg stacked) の場合および外電側 Y, 負荷側 Y +  $\Delta$  の安定巻線 (3-leg stacked, 5-leg stacked) の場合は, 電圧の変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, または困難である. 従って, 変圧器一次側の 3 相全ての電流計監視および特高開閉所内の送電線から変圧器一次側までの受電経路の巡視点検などによる早期の異常発見が重要と考えられる.
- ②しかし, 上記以外の結線の変圧器は, 制御室の電圧計の変化で地絡のない一相開放 (欠相) を検出することはできる.
- 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, 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.
- ④変圧器の結線の種類, 鉄心の構成 (3-leg stacked, 5-leg stacked など), 接地の状況, 負荷の状況などによって, 一相開放 (欠相) の検出の可否は, 異なる可能性が有るので, シミュレーションなどで個別に実機の解析が必要と考えられる.
- ⑤発電所の運転員などに対して, このような事象が発生する可能性が有ることを周知することが必須である.

### 参考文献

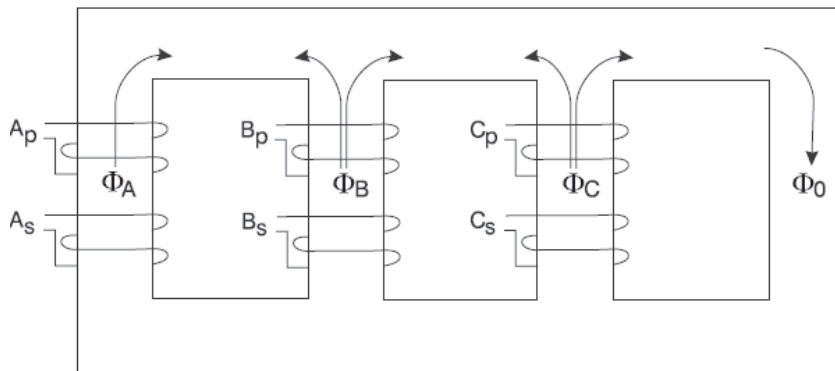
- (1) NRC BULLETIN 2012-01, DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM
- (2) NRC INFORMATION NOTICE 2012-03: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM
- (3) A Practical Guide for Detecting Single-Phasing on a Three-Phase Power System by John Horak and Gerald F. Johnson, Basler Electric Company
- (4) 嶋田 善夫, 「非常用ディーゼル発電機のコンピュータシミュレーションによる過渡性能評価」, INSS JOURNAL, Vol.19, P221 (2012).
- (5) Meyer, W.S., et al Editors "EMTP Rule Book" Portland, Oregon, Revised 1992. Bonneville Power Administration, System Engineering, 1980.

付録

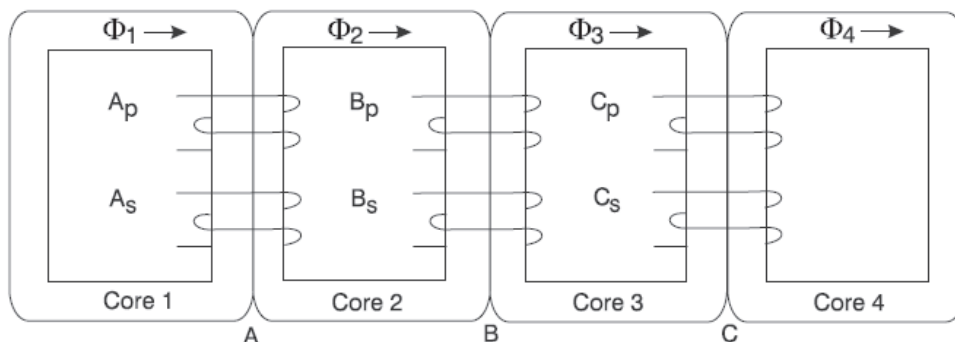
変圧器の鉄心の構成



Three Legged Core Transformer



Four-Legged Core Form Transformer



Five-Legged Shell Form Transformer