

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（一昨年の続報） －米国電力研究所（EPRI）の変圧器の 欠相検出方法に係る検証－

Transient evaluation using EMTP at one phase opening with the offsite power transformer
for the emergency power supply systems of nuclear power plants
(This report is a follow-up of the report published two years ago.)

－ Verification related to the open-phase detection method of the transformer
by United States Electric Power Research Institute (EPRI) －

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。

2014年のINSS JOURNALの論文は、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した。続報として、本論文では、米国電力研究所（EPRI）が開発した変圧器無負荷時の欠相を検出する方法を解説し、EPRIからまだ詳細なデータが公開されていないことから、INSSがEMTPを用いて当該手法の検証を実施した解析結果を報告する。

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, EPRI, 中性点

Abstract The emergency power supply systems of nuclear power plants, as the objects of this research, are critical in supplying stable electric power to such systems as the emergency core cooling system (ECCS), and in maintaining safety of the nuclear power reactor; this was apparent in the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. The USNRC issued regulatory documents (BL 2012-01, IN 2012-03), and has commenced evaluations on newly emerged vulnerability in the design of power supply systems which cannot be detected with degraded-voltage protection relays, with certain kinds of configuration of coils and iron core structures, such as when the offsite power supply side is a wye-connection and the load side is a delta-connection etc., when the detection of one-phase open fault with the circuit of a transformer which is without a ground fault connected to the offsite power supply system. The report in the INSS JOURNAL 2013 used simulation by the electro-magnetic transients program (EMTP) and clearly described the response at the time of the power supply side one-phase open without ground fault for various configuration of coils and various iron core structures of the three-phase

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

transformer, and identified the important issues in 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. The report in the INSS JOURNAL 2014 summarizes the previous results, and then presents the principles by which normal voltages are maintained in 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 simulations of operations of the protection relays of the emergency power supply systems and the safety related components of representative a domestic PWR plant with EMTP. In a continuation of the previous reports, this report explains the method to detect open-phase when the transformer is no-load which United States Electric Power Research Institute (EPRI) developed. As the detailed analyses data from EPRI related to the detection method concerned have not been disclosed officially yet, in this paper, the quantitative and detailed verification results of the method using EMTP is reported.

Keywords emergency power supply system, safety related component, three phase transformer, open-phase, NRC, EMTP, protection relay, EPRI, neutral point

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、①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、②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、③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。

さらに、2014年のINSS JOURNALの論文⁽⁶⁾ では、①2013年のINSS JOURNALの論文の結果を簡潔にまとめた、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した、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した。

本論文では、①EPRIが開発した変圧器の中性点から電流を注入することにより、検出の極めて困難な変圧器無負荷時の欠相を検出する方法が、国内外で注目されていることから、その内容を解説するとともに、②EPRIから詳細な解析データが、まだ公表されていないことから、INSSがEMTPを用いて解析した当該手法の定量的な検証結果を報告する。

2. 米国電力研究所 (EPRI) の変圧器の一次側欠相の検出方法の概要

この章では、変圧器の中性点から電流を注入し、その電流の変化によって、無負荷時、軽負荷時、重負荷時を問わずに欠相を検出する手法をEPRIが開発し、注目されていることから、その概要をEPRIの報告書⁽⁷⁾の記載内容に基づいて紹介する。

図1は、欠相の無い正常な系統の変圧器が運転している状態で、変圧器の中性点から注入した電流の流れを示す。

図2は、1相が欠相した系統の変圧器が運転している状態で、変圧器の中性点から注入した電流の流れ

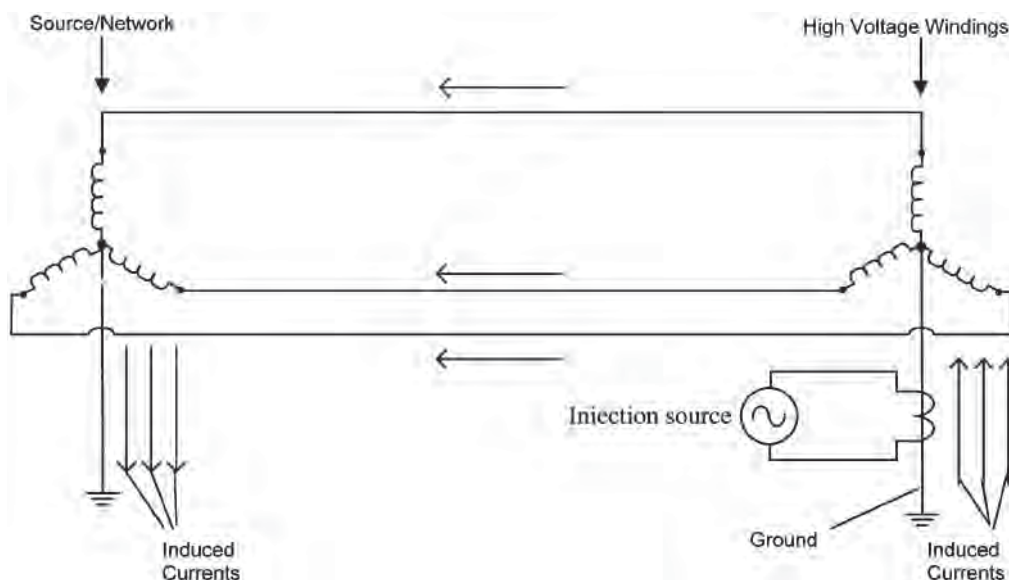


図1 欠相の無い正常な系統において、変圧器が運転している状態で、変圧器の中性点から注入した電流の流れ

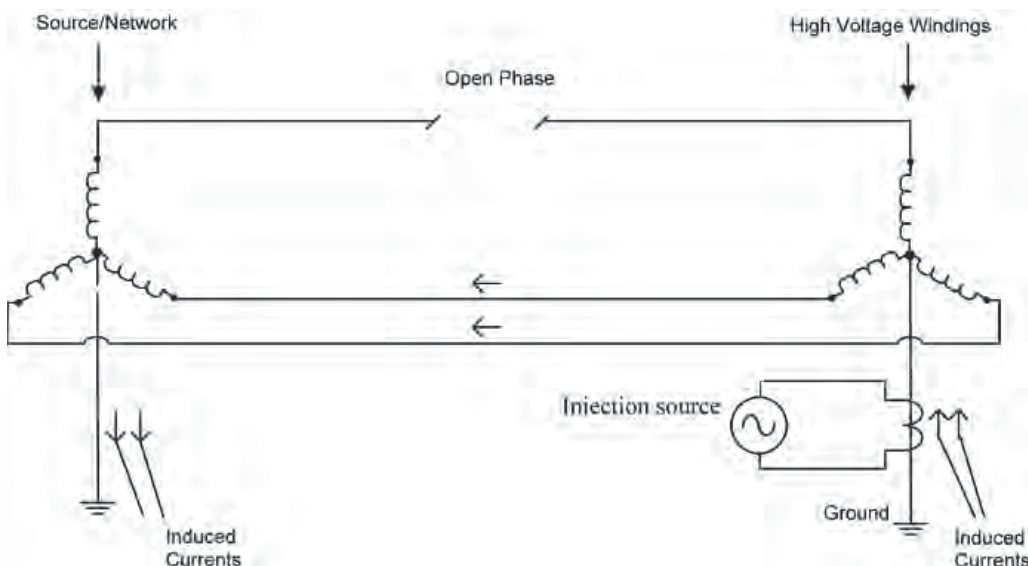


図2 1相が欠相した系統において、変圧器が運転している状態で、変圧器の中性点から注入した電流の流れ

れを示す。

EPRIの手法は、欠相時の変圧器の中性点から見た系統の零相インピーダンスが増加することを、中性点から注入した電流の減少によって検出するものである。

図3は、EPRIが実施した無負荷の変圧器の欠相前後の中性点に注入した電流変化を、測定した実験結果である。図から、欠相前の中性点注入電流は、528mA（周波数：89.29Hz、注入電圧369mV）であり、欠相後の中性点電流は、バックグラウンドノイズレベルの80mA（周波数:25kHz、注入電圧は図から直接読み取れないが、左図と比較して変化は無いと思われる）に低下したことが読み取れる。

3. INSSが実施した変圧器の一次側欠相前後の中性点注入電流の解析結果

INSSは、代表国内PWRプラントで実際に使用している変圧器を対象として、当該変圧器の中性点から注入する電流および周波数を変化させ、変圧器一次側の欠相前後の電流変化を、EMTPにより解析した。

(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)

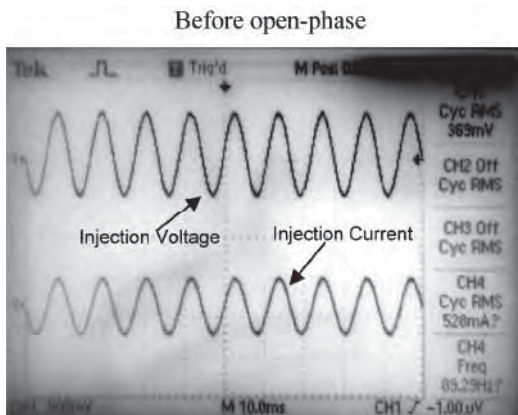


図3 欠相前後の変圧器中性点に注入した電流変化の測定結果

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：無負荷, 50%負荷 (19MVA (力率0.8)), 100%負荷 (38MVA (力率0.8))

欠相：0.5秒でA相が欠相

変圧器中性点から注入する電流：0.01A～1000A

変圧器中性点から注入する周波数：10Hz～1020Hz

図4は、EMTPによる解析を行うために使用した単線結線図である。

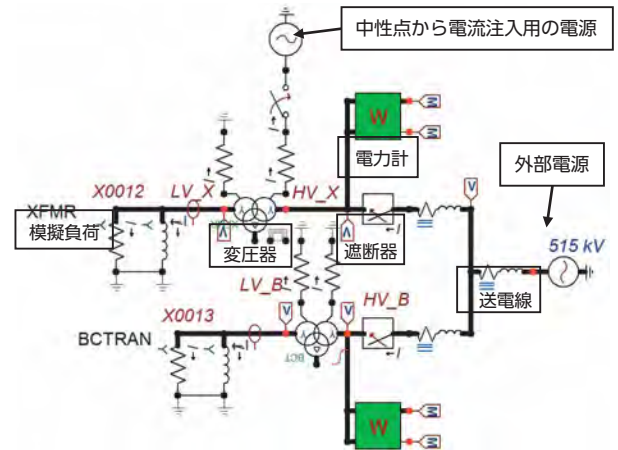
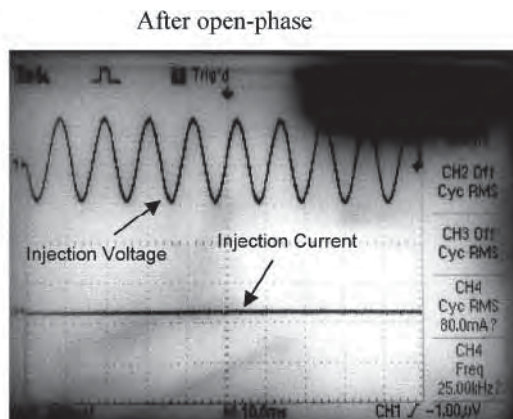


図4 変圧器一次側の欠相前後の中性点から注入した電流の解析に使用した単線結線図

(2) 解析結果

図5は、変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の時の、中性点の電流波形である。図6は、図5の波形をフーリエ変換したものであり、外部電源周波数の60Hz、およびその高調波120Hz、180Hz、



240Hzの成分の電流が大きい。中でも、180Hzの成分が大きい。なお、フーリエ変換した図6の縦軸は、電流の実効値であり、横軸は、5Hzを基本波とした高調波を示す。すなわち、横軸の12は $5\text{Hz} \times 12 = 60\text{Hz}$ 、横軸の24は $5\text{Hz} \times 24 = 120\text{Hz}$ 、横軸の36は $5\text{Hz} \times 36 = 180\text{Hz}$ の周波数を示す。フーリエ変換の図の横軸と縦軸の説明は、図8、図10、図12についても図6と同様である。

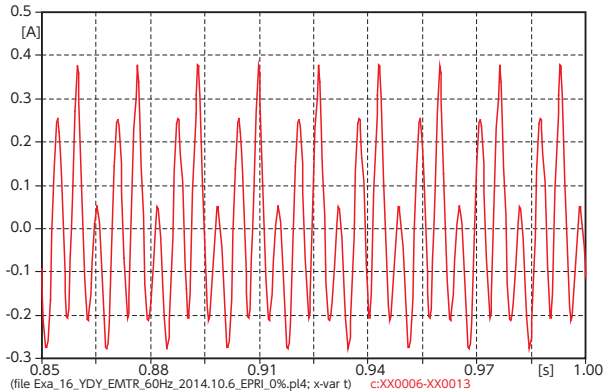


図5 変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の中性点の電流波形

MC'sPlotXY-Fourierchart(s).Copyingdate:2014/12
 File Exa_16_YDY_EMTR_60Hz_2014.10.6_EPRI_0%.pl4
 Variable c:XX0006- Initial Time: 0.8 Final Time: 1

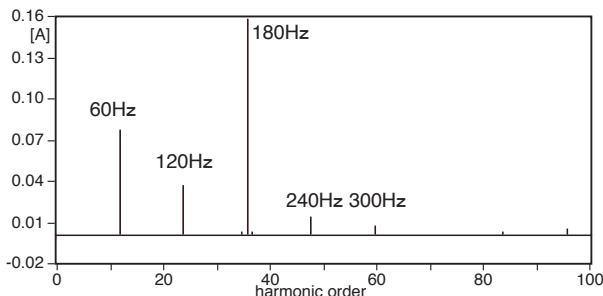


図6 図5の波形をフーリエ変換

図7は、変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の中性点に1A、10Hzの電流を注入した中性点の電流波形である。図8は、図7の波形をフーリエ変換したものであり、注入した10Hzの電流以外に、外部電源周波数の60Hz、およびその高調波120Hz、180Hzの電流成分が大きい。

図9は、変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の中性点に1A、10Hzの電流を注入した状態に加えて、0.5秒で1相欠相させた中性点の電流波形である。図10は、図9の欠相後の波形をフーリエ変換したものであり、注入した10Hzの電流は極めて小さくなり、外部電源の60Hzの電

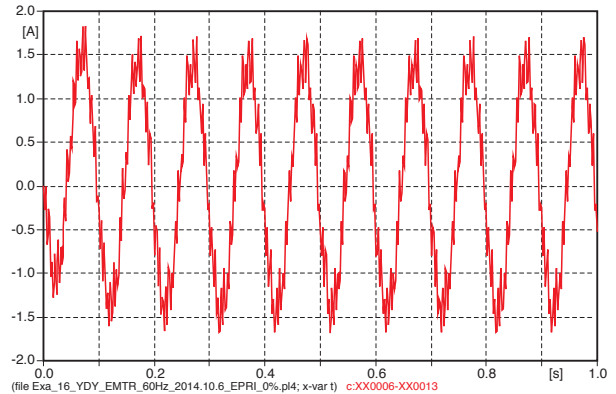


図7 変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の中性点に1A、10Hzの電流を注入した中性点の電流波形

MC'sPlotXY-Fourierchart(s).Copyingdate:2014/12
 File Exa_16_YDY_EMTR_60Hz_2014.10.6_EPRI_0%.pl4
 Variable c:XX0006- Initial Time: 0.8 Final Time: 1

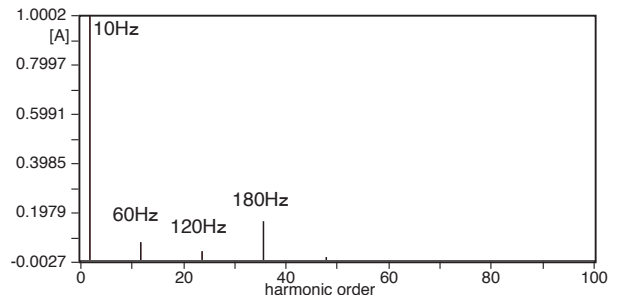


図8 図7の波形をフーリエ変換

流が突出して大きく、300Hzの電流が少しある。

図11は、変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の中性点に1A、10Hzの電流を注入した状態に加えて、0.5秒で2相欠相させた中性点の電流波形である。図12は、図11の欠相後の波形をフーリエ変換したものであり、注入した10Hzの電流は極めて小さくなり、外部電源の60Hzの電流が突出して大きく、その高調波の180Hz、300Hzの電流も比較的大きい。

図13は、変圧器が欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の負荷、変圧器の中性点に注入する電流値、および変圧器の中性点に注入する電流の周波数をそれぞれ変化させた場合に、変圧器の1相欠相または2相欠相による注入した中性点電流の変化を示す。この図から、変圧器無負荷時は、周波数に依存せず欠相前後の注入電流の変化により、欠相の検出が可能である。一方、変圧器50または100%負荷時は、周波数が高くなるにつれて欠相前後の注入電流の変化が小さくなり、欠相の検出が困難となる。

表1から表3は、上記の図13の基になる解析結

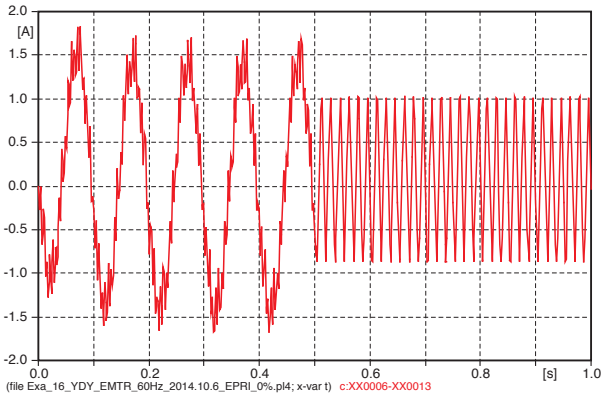


図9 変圧器が無負荷時に欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の中性点に1A、10Hzの電流を注入した状態に加えて、0.5秒で1相欠相させた中性点の電流波形

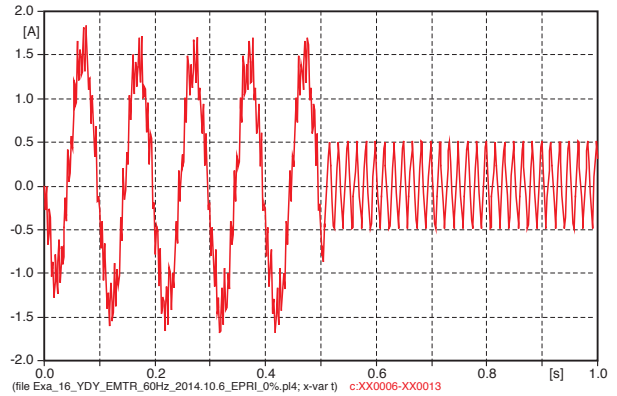


図11 変圧器が無負荷で欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の中性点に1A、10Hzの電流を注入した状態に加えて、0.5秒で2相欠相させた中性点の電流波形

MC'sPlotXY-Fourierchart(s).Copyingdate:2014/12
File Exa_16_YDY_EMTR_60Hz_2014.10.6_EPRI_0%.pl4
Variable c:XX0006- Initial Time: 0.8 Final Time: 1

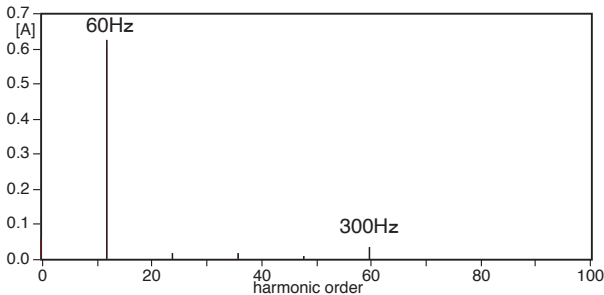


図10 図9の波形をフーリエ変換

MC'sPlotXY-Fourierchart(s).Copyingdate:2014/12
File Exa_16_YDY_EMTR_60Hz_2014.10.6_EPRI_0%.pl4
Variable c:XX0006- Initial Time: 0.8 Final Time: 1

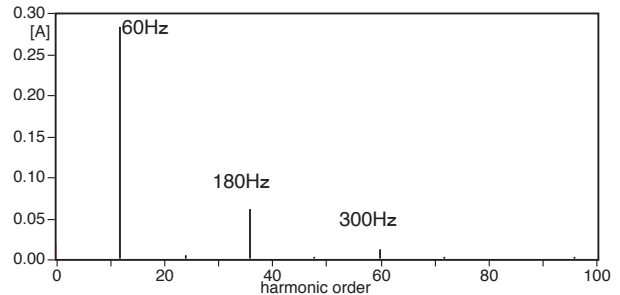


図12 図11の波形をフーリエ変換

果の詳細データであり、総数は342事例である。表中の赤枠の範囲は、①欠相後の注入電流の減少幅が大きく欠相の検出に使える、かつ②電流を注入するために必要な電圧が、変圧器の定格電圧500kVと比較して妥当な電圧範囲（すなわち100kV未満）の2つの条件に合致する。

その中で、緑で着色した範囲は、①欠相後の注入電流の減少幅が十分に大きく、変圧器の負荷によらず（無負荷～100%負荷）欠相の検出が可能、かつ②電流を注入するために必要な電圧は、出来るだけ低くして（数千V以下）、欠相検出装置の製作費用はできるだけ低コスト、かつ③ノイズによる誤検出を防止するため、出来るだけ大きい電流（1A以上）を流したい、以上の3つの条件に合致する範囲である。

図13および表1, 2, 3から以下のことがわかった、①中性点から注入する電流の周波数は、低い周波数のほうがよい（理由は、印加する電圧が低くできることであり、10Hz～30Hz程度が最適と考えられる）、②中性点から注入する電流値は適切な範囲

がある（小さすぎる電流値は、バックグラウンドの電流に埋没し、大きすぎる電流値は、印加する電圧が大きくなりすぎることから、1A～10Aが最適と考えられる）

図14は、表1から表3の中で、緑で着色した注入電流・周波数の最適と思われる範囲をグラフで表示した。その結果、変圧器の負荷条件に関わらず、注入した電流が、欠相後には大幅に減少し、欠相を検出できることが確認できた。

変圧器無負荷時の欠相による中性点注入電流の変化(欠相なしの時に1A注入)



変圧器50%負荷時の欠相による中性点注入電流の変化(欠相なしの時に1A注入)



変圧器100%負荷時の欠相による中性点注入電流の変化(欠相なしの時に1A注入)



変圧器無負荷時の欠相による中性点注入電流の変化(欠相なしの時に100A注入)



変圧器50%負荷時の欠相による中性点注入電流の変化(欠相なしの時に100A注入)



変圧器100%負荷時の欠相による中性点注入電流の変化(欠相なしの時に100A注入)



図13 変圧器が欠相の無い正常な状態の時に、変圧器の負荷、変圧器の中性点に注入する電流値、および変圧器の中性点に注入する電流の周波数をそれぞれ変化させた場合に、変圧器の1相欠相または2相欠相による注入した中性点電流の変化

表1 変圧器無負荷時に変圧器の中性点に注入する電流値、および変圧器の中性点に注入する電流の周波数をそれぞれ変化させた場合に、変圧器の1相欠相または2相欠相による注入した中性点電流の変化

周波数(Hz)	欠相の有無	注入電流(A)(印加電圧(V))					
		0.01A(0.7235V)	0.1A(7.220V)	1A(72.18V)	10A(721.8V)	100A(7218V)	1000A(48070V)
10Hz	欠相なし	0.01A(0.7235V)	0.1A(7.220V)	1A(72.18V)	10A(721.8V)	100A(7218V)	1000A(48070V)
	一相欠相	0.0001525A	0.00006733A	0.00153A	0.01871A	0.2616A	38.21A
	二相欠相	0.0002186A	0.0002165A	0.0004016A	0.005585A	0.04221A	4.914A
30Hz	欠相なし	0.01A(2.088V)	0.1A(20.84V)	1A(208.4V)	10A(2084V)	100A(20840V)	1000A(136300V)
	一相欠相	0.0004177A	0.0002674A	0.001339A	0.01923A	0.2244A	29.84A
	二相欠相	0.0003115A	0.0003013A	0.0004666A	0.00453A	0.04186A	2.665A
60Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(29.52V)	1A(416.7V)	10A(4155V)	100A(41540V)	1000A(270900V)
	一相欠相	電源に60Hzの成分が多いため検出不能	0.6203A	0.6221A	0.6468A	1.062A	83.92A
	二相欠相	電源に60Hzの成分が多いため検出不能	0.2825A	0.2827A	0.2854A	0.3168A	4.213A
120Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(109.95V)	1A(857.95V)	10A(8335V)	100A(83150V)	1000A(543400V)
	一相欠相	電源に120Hzの成分が多いため検出不能	0.01338A	0.01255A	0.01716A	0.1938A	41.43A
	二相欠相	電源に120Hzの成分が多いため検出不能	0.004898A	0.00515A	0.008017A	0.04744A	2.787A
180Hz	欠相なし	0.01A	0.1A	1A(1051.5V)	10A(12285V)	100A(124550V)	807.7A(700000V)
	一相欠相	電源に180Hzの成分が多いため検出不能	0.01494A	0.003651A	0.2A	26.49A	4.342A
	二相欠相	電源に180Hzの成分が多いため検出不能	0.06062A	0.06456A	0.1117A	4.342A	4.342A
240Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(187.1V)	1A(1689V)	10A(16700V)	100A(166900V)	880.3A(1000000V)
	一相欠相	電源に240Hzの成分が多いため検出不能	0.006204A	0.004354A	0.01589A	0.2289A	23.63A
	二相欠相	電源に240Hzの成分が多いため検出不能	0.002771A	0.002403A	0.00242A	0.04575A	2.43A
300Hz	欠相なし	0.01A(8.6V)	0.1A(199.6V)	1A(2083V)	10A(20910V)	100A(209200V)	605.9A(1000000V)
	一相欠相	0.03129A	0.03149A	0.03338A	0.05423A	0.3096A	13.61A
	二相欠相	0.01161A	0.01165A	0.012A	0.01589A	0.05967A	1.76A
360Hz	欠相なし	0.01A(24.44V)	0.1A(251.2V)	1A(2520V)	10A(25200V)	100A(252000V)	323.7A(800000V)
	一相欠相	0.001343A	0.001555A	0.003506A	0.0237A	0.2535A	3.953A
	二相欠相	0.002502A	0.002488A	0.002385A	0.004666A	0.04926A	0.2589A
420Hz	欠相なし	0.01A(35.89V)	0.1A(302V)	1A(2960V)	10A(29540V)	100A(295400V)	472.5A(1200000V)
	一相欠相	0.003069A	0.00286A	0.0007963A	0.02106A	0.249A	8.311A
	二相欠相	0.001734A	0.001732A	0.001774A	0.005365A	0.05147A	0.5676A
480Hz	欠相なし	0.01A(20.13V)	0.1A(325.4V)	1A(3380V)	10A(33930V)	100A(339300V)	298.4A(1000000V)
	一相欠相	0.002108A	0.002261A	0.004351A	0.02645A	0.2698A	3.268A
	二相欠相	0.002013A	0.002027A	0.002239A	0.006455A	0.05439A	0.2298A
540Hz	欠相なし	0.01A(48.1V)	0.1A(393.9V)	1A(3851V)	10A(38430V)	100A(384100V)	261.8A(1000000V)
	一相欠相	0.002814A	0.002731A	0.002922A	0.02445A	0.2851A	2.135A
	二相欠相	0.001001A	0.000956A	0.000572A	0.004863A	0.0564A	0.1685A
600Hz	欠相なし	0.01A(25.35V)	0.1A(412.5V)	1A(4280V)	10A(42950V)	100A(429800V)	259.2A(1100000V)
	一相欠相	0.00329A	0.003388A	0.004944A	0.02817A	0.2898A	2.131A
	二相欠相	0.001702A	0.001744A	0.002224A	0.007136A	0.06022A	0.1792A
660Hz	欠相なし	0.01A(53.55V)	0.1A(482.3V)	1A(4770V)	10A(47630V)	100A(476300V)	234.8A(1100000V)
	一相欠相	0.001823A	0.001956A	0.004033A	0.02956A	0.2957A	1.904A
	二相欠相	0.0004409A	0.0003849A	0.0001882A	0.005755A	0.06326A	0.1581A
720Hz	欠相なし	0.01A(51.3V)	0.1A(522.8V)	1A(5238V)	10A(52390V)	100A(523900V)	254.4A(1300000V)
	一相欠相	0.0006714A	0.0009354A	0.003508A	0.02941A	0.3113A	1.939A
	二相欠相	0.001527A	0.001585A	0.002139A	0.007862A	0.06656A	0.1833A
780Hz	欠相なし	0.01A(52.58V)	0.1A(568.1V)	1A(5723V)	10A(57260V)	100A(572600V)	209.8A(1200000V)
	一相欠相	0.001552A	0.001828A	0.004449A	0.03101A	0.3231A	1.218A
	二相欠相	0.00111A	0.001069A	0.0007972A	0.005965A	0.06803A	0.1529A
840Hz	欠相なし	0.01A(77.75V)	0.1A(639V)	1A(6245V)	10A(62300V)	100A(623000V)	243.6A(1500000V)
	一相欠相	0.002481A	0.002394A	0.00339A	0.03122A	0.3344A	1.381A
	二相欠相	0.0009838A	0.001012A	0.001393A	0.007337A	0.07179A	0.1947A
900Hz	欠相なし	0.01A(37.25V)	0.1A(644.5V)	1A(6715V)	10A(67430V)	100A(674500V)	179.6A(1200000V)
	一相欠相	0.0008936A	0.0006892A	0.002613A	0.03308A	0.3548A	0.9745A
	二相欠相	0.001131A	0.001147A	0.001469A	0.007572A	0.07607A	0.1387A
960Hz	欠相なし	0.01A(75.27V)	0.1A(729.9V)	1A(7280V)	10A(72750V)	100A(727600V)	207.6A(1500000V)
	一相欠相	0.0003452A	0.000364A	0.003268A	0.03491A	0.366A	1.445A
	二相欠相	0.0001972A	0.000191A	0.00071A	0.007564A	0.07893A	0.1762A
1020Hz	欠相なし	0.01A(86.97V)	0.1A(791V)	1A(7835V)	10A(78250V)	100A(782500V)	179A(1400000V)
	一相欠相	0.003176A	0.003337A	0.005568A	0.03673A	0.3824A	1.272A
	二相欠相	0.0005344A	0.000605A	0.00131A	0.008454A	0.08222A	0.153A

表2 変圧器50%負荷時に変圧器の中性点に注入する電流値, および変圧器の中性点に注入する電流の周波数をそれぞれ変化させた場合に, 変圧器の1相欠相または2相欠相による注入した中性点電流の変化

周波数 (Hz)	欠相の有無	注入電流 (A)(印加電圧 (V))					
		0.01A(0.7235V)	0.1A(7.220V)	1A(72.18V)	10A(721.8V)	100A(7218V)	1000A(48070V)
10Hz	欠相なし	0.01A(0.7235V)	0.1A(7.220V)	1A(72.18V)	10A(721.8V)	100A(7218V)	1000A(48070V)
	一相欠相	0.04259A	0.04139A	0.06422A	0.6092A	6.194A	69.35A
	二相欠相	0.008218A	0.007659A	0.01424A	0.1583A	1.619A	20.97A
30Hz	欠相なし	0.01A(2.089V)	0.1A(20.85V)	1A(208.5V)	10A(2084V)	100A(20840V)	1000A(136300V)
	一相欠相	0.08574A	0.05568A	0.04024A	0.6434A	6.871A	62.4A
	二相欠相	0.02161A	0.02068A	0.01813A	0.1699A	1.803A	14.54A
60Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(29.75V)	1A(416.9V)	10A(4155V)	100A(41540V)	1000A(270900V)
	一相欠相	電源に60Hzの成分が多いため検出不能	58.18	58.27	59.12	67.65	167.5
	二相欠相	電源に60Hzの成分が多いため検出不能	30.63	30.64	30.75	31.95	44.07
120Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(109V)	1A(857.5V)	10A(8335V)	100A(83150V)	1000A(543300V)
	一相欠相	電源に120Hzの成分が多いため検出不能	0.03824A	0.1797A	1.595A	15.76A	111.7A
	二相欠相	電源に120Hzの成分が多いため検出不能	0.02244A	0.0525A	0.4262A	4.201A	40.2A
180Hz	欠相なし	0.01A	0.1A	1A(1053V)	10A(12285V)	100A(124550V)	1000A(805000V)
	一相欠相	電源に180Hzの成分が多いため検出不能	0.2404A	0.2404A	2.226A	22.1A	153.2A
	二相欠相	電源に180Hzの成分が多いため検出不能	0.1006A	0.1006A	0.622A	6.029A	42.27A
240Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(186.2V)	1A(1688V)	10A(16700V)	100A(166900V)	875A(1000000V)
	一相欠相	電源に240Hzの成分が多いため検出不能	0.03359A	0.285A	2.8A	27.96A	173.1A
	二相欠相	電源に240Hzの成分が多いため検出不能	0.01089A	0.07949A	0.7827A	7.822A	47.93A
300Hz	欠相なし	0.01A(9.27V)	0.1A(200.2V)	1A(2083V)	10A(20910V)	100A(209200V)	416.5A(800000V)
	一相欠相	0.0259A	0.04705A	0.34A	3.325A	33.2A	128.1A
	二相欠相	0.0168A	0.02507A	0.1106A	0.9719A	9.59A	37.07A
360Hz	欠相なし	0.01A(24.51V)	0.1A(251.5V)	1A(2520V)	10A(25200V)	100A(252000V)	281A(700000V)
	一相欠相	0.01482A	0.04865A	0.3882A	3.784A	37.75A	105.2A
	二相欠相	0.005791A	0.01302A	0.1133A	1.126A	11.26A	31.31A
420Hz	欠相なし	0.01A(35.4V)	0.1A(301.5V)	1A(2960V)	10A(29540V)	100A(295400V)	309.3A(900000V)
	一相欠相	0.009602A	0.04677A	0.4217A	4.17A	41.67A	127.4A
	二相欠相	0.004941A	0.01647A	0.1322A	1.29A	12.87A	39.25A
480Hz	欠相なし	0.01A(21.35V)	0.1A(326.7V)	1A(3380V)	10(33930V)	100A(339300V)	268A(900000V)
	一相欠相	0.01206A	0.05184A	0.4564A	4.507A	45A	119.7A
	二相欠相	0.005802A	0.01653A	0.1452A	1.44A	14.38A	38.18A
540Hz	欠相なし	0.01A(47.18V)	0.1A(393V)	1A(3850V)	10A(38430V)	100A(384100V)	322.7A(1200000V)
	一相欠相	0.006709A	0.04975A	0.4801A	4.785A	47.83A	150.2A
	二相欠相	0.003467A	0.01743A	0.1596A	1.582A	15.8A	49.43A
600Hz	欠相なし	0.01A(25.78V)	0.1A(413.2V)	1A(4280V)	10A(42950V)	100A(429800V)	259.1A(1100000V)
	一相欠相	0.009125A	0.05357A	0.5053A	5.024A	50.24A	128.9A
	二相欠相	0.005508A	0.02004A	0.1739A	1.715A	17.14A	43.89A
660Hz	欠相なし	0.01A(53.18V)	0.1(482V)	1A(4770V)	10A(47630V)	100A(476300V)	253.5A(1200000V)
	一相欠相	0.01033A	0.05727A	0.5276A	5.229A	52.26A	132.1A
	二相欠相	0.004064A	0.02028A	0.1856A	1.838A	18.37A	46.3A
720Hz	欠相なし	0.01A(51.79V)	0.1A(523.3V)	1A(5238V)	10A(52390V)	100A(523900V)	256A(1300000V)
	一相欠相	0.009441A	0.058A	0.5437A	5.401A	53.98A	134.2A
	二相欠相	0.005405A	0.02294A	0.1985A	1.954A	19.51A	48.44A
780Hz	欠相なし	0.01A(51.83V)	0.1A(567.6V)	1A(5723V)	10A(57260V)	100A(572600V)	227.4A(1300000V)
	一相欠相	0.009175A	0.05892A	0.5579A	5.546A	55.43A	126.1A
	二相欠相	0.00395A	0.02198A	0.207A	2.057A	20.56A	46.7A
840Hz	欠相なし	0.01A(78.5V)	0.1A(640V)	1A(6245V)	10A(62300V)	100A(623000V)	243.3A(1500000V)
	一相欠相	0.009211A	0.06029A	0.5704A	5.672A	56.71A	136.8A
	二相欠相	0.004497A	0.0239A	0.2177A	2.156A	21.54A	51.9A
900Hz	欠相なし	0.01A(36.55V)	0.1A(644.5V)	1A(6715V)	10A(67430V)	100A(674500V)	178.8A(1500000V)
	一相欠相	0.007228A	0.05928A	0.5792A	5.779A	57.78A	104.9A
	二相欠相	0.003748A	0.02365A	0.2255A	2.244A	22.43A	41.55A
960Hz	欠相なし	0.01A(76.85V)	0.1A(732V)	1A(7280V)	10A(72750V)	100A(727600V)	164.9A(1200000V)
	一相欠相	0.008875A	0.06152A	0.5896A	5.871A	58.7A	96.83A
	二相欠相	0.004301A	0.02517A	0.2344A	2.326A	23.25A	38.35A
1020Hz	欠相なし	0.01A(85.88V)	0.1A(790.5V)	1A(7830V)	10A(78250V)	100A(782500V)	140.6A(1100000V)
	一相欠相	0.01066A	0.06423A	0.5994A	5.953A	59.5A	83.65A
	二相欠相	0.004802A	0.02638A	0.2423A	2.402A	24A	33.74A

表3 変圧器100%負荷時に変圧器の中性点に注入する電流値, および変圧器の中性点に注入する電流の周波数をそれぞれ変化させた場合に, 変圧器の1相欠相または2相欠相による注入した中性点電流の変化

周波数 (Hz)	欠相の有無	注入電流 (A)(印加電圧 (V))					
		0.01A(0.724V)	0.1A(7.220V)	1A(72.18V)	10A(721.8V)	100A(7218V)	1000A(48080V)
10Hz	欠相なし	0.01A(0.724V)	0.1A(7.220V)	1A(72.18V)	10A(721.8V)	100A(7218V)	1000A(48080V)
	一相欠相	0.06941A	0.06819A	0.1192A	1.109A	11.22A	97.89A
	二相欠相	0.02525A	0.01704A	0.02902A	0.3004A	3.058A	24.34A
30Hz	欠相なし	0.01A(2.09V)	0.1A(20.86V)	1A(208.5V)	10A(2085V)	100A(20850V)	1000A(136300V)
	一相欠相	0.1021A	0.09301A	0.07057A	1.168A	12.46A	95.44A
	二相欠相	0.04212A	0.04054A	0.03717A	0.3217A	3.404A	25.76A
60Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(27.6V)	1A(417.5V)	10A(4158V)	100A(41540V)	1000A(270900V)
	一相欠相	電源に60Hzの成分が多いため検出不能	104.9	105.1	106.6	121.9	254.8
	二相欠相	電源に60Hzの成分が多いため検出不能	58.01	58.04	58.25	60.51	81.24
120Hz	欠相なし	0.01A	0.1A(98.95V)	1A(847V)	10A(8325V)	100A(83110V)	1000A(543000V)
	一相欠相	電源に120Hzの成分が多いため検出不能	0.07158A	0.317A	2.773A	27.34A	188.2A
	二相欠相	電源に120Hzの成分が多いため検出不能	0.05142A	0.1068A	0.8041A	7.861A	52.94A
180Hz	欠相なし	0.01A	0.1A	1A(1059.5V)	10A(12295V)	100A(124550V)	999.4A(805000V)
	一相欠相	電源に180Hzの成分が多いため検出不能	0.04677A	0.3853A	3.65A	36.31A	354.7A
	二相欠相	電源に180Hzの成分が多いため検出不能	0.02117A	0.2117A	1.13A	11.04A	75.73A
240Hz	欠相なし	0.01A(28.35V)	0.1A(178.6V)	1A(1680V)	10A(16700V)	100A(166900V)	741.9A(900000V)
	一相欠相	0.02172A	0.06069A	0.4502A	4.346A	43.32A	242.4A
	二相欠相	0.01793A	0.02819A	0.1513A	1.407A	13.97A	76.67A
300Hz	欠相なし	0.01A(13.86V)	0.1A(206.5V)	1A(2083V)	10A(20920V)	100A(209200V)	605.1A(1000000V)
	一相欠相	0.02895A	0.07017A	0.34A	4.87A	48.54A	240.5A
	二相欠相	0.0203A	0.03525A	0.1106A	1.676A	16.59A	80.84A
360Hz	欠相なし	0.01A(24.09V)	0.1A(252.1V)	1A(2521V)	10A(25210)	100A(252000V)	604.9A(700000V)
	一相欠相	0.02307A	0.07043A	0.5418A	5.256A	52.39A	105.2A
	二相欠相	0.01065A	0.02624A	0.1952A	1.892A	18.86A	31.31A
420Hz	欠相なし	0.01A(35.4V)	0.1A(301.5V)	1A(2960V)	10A(29540V)	100A(295400V)	309.3A(1200000V)
	一相欠相	0.009602A	0.04677A	0.4217A	4.17A	41.67A	256.4A
	二相欠相	0.004941A	0.01647A	0.1322A	1.29A	12.87A	91.01A
480Hz	欠相なし	0.01A(26.75V)	0.1A(332.5V)	1A(3387V)	10A(33930V)	100A(339400V)	373.9A(1200000V)
	一相欠相	0.01721A	0.06878A	0.5851A	5.747A	57.39A	205.6A
	二相欠相	0.008776A	0.02817A	0.2301A	2.253A	22.48A	79.86A
540Hz	欠相なし	0.01A(39.03V)	0.1A(385.3V)	1A(3843V)	10A(38430V)	100A(384100V)	321.2A(1200000V)
	一相欠相	0.01334A	0.06648A	0.5975A	5.909A	59A	186.2A
	二相欠相	0.007423A	0.02856A	0.2435A	2.394A	23.89A	75.03A
600Hz	欠相なし	0.01A(34.88V)	0.1A(422.3V)	1A(4290V)	10A(42960V)	100A(429800V)	298.6A(1200000V)
	一相欠相	0.01321A	0.06722A	0.6094A	6.031A	60.28A	169.1A
	二相欠相	0.00739A	0.0296A	0.2552A	2.512A	25.09A	70.14A
660Hz	欠相なし	0.01A(46.34V)	0.1A(475.5V)	1A(4763V)	10A(47630V)	100A(476300V)	231.7A(1100000V)
	一相欠相	0.01454A	0.06968A	0.6209A	6.132A	61.26A	141.8A
	二相欠相	0.00712A	0.03033A	0.2652A	2.614A	26.1A	60.31A
720Hz	欠相なし	0.01A(55.93V)	0.1A(528.3V)	1A(5244V)	10A(52390V)	100A(523900V)	210.2A(1100000V)
	一相欠相	0.01334A	0.06926A	0.6275A	6.209A	62.04A	130.5A
	二相欠相	0.007593A	0.03178A	0.2744A	2.7A	26.96A	56.63A
780Hz	欠相なし	0.01A(51.83V)	0.1A(567.3V)	1A(5723V)	10A(57260V)	100A(572700V)	209.8A(1200000V)
	一相欠相	0.01321A	0.06958A	0.6336A	6.271A	62.67A	131.6A
	二相欠相	0.007077A	0.03157A	0.2808A	2.773A	27.69A	58.04A
840Hz	欠相なし	0.01A(73.72V)	0.1A(634.1V)	1A(6241V)	10A(62300V)	100A(623000V)	242.2A(1500000V)
	一相欠相	0.01422A	0.07105A	0.6396A	6.325A	63.21A	152.7A
	二相欠相	0.007114A	0.03256A	0.2875A	2.836A	28.33A	68.25A
900Hz	欠相なし	0.01A(35.6V)	0.1A(643V)	1A(6715V)	10A(67430V)	100A(674500V)	207.8A(1400000V)
	一相欠相	0.01026A	0.06753A	0.6401A	6.365A	63.63A	132.3A
	二相欠相	0.007116A	0.03289A	0.2926A	2.89A	28.86A	59.93A
960Hz	欠相なし	0.01A(74.1V)	0.1A(729V)	1A(7277V)	10A(72750V)	100A(727600V)	164.9A(1200000V)
	一相欠相	0.01265A	0.07006A	0.6457A	6.401A	63.98A	105.6A
	二相欠相	0.006436A	0.03279A	0.2967A	2.935A	29.32A	48.36A
1020Hz	欠相なし	0.01A(82.4V)	0.1A(787V)	1A(7830V)	10A(78250V)	100A(782500V)	140.6A(1100000V)
	一相欠相	0.01255A	0.07026A	0.6486A	6.432A	64.28A	90.38A
	二相欠相	0.0007983A	0.03474A	0.3022A	2.976A	29.72A	41.79A

変圧器欠相検出の最適と考えられる中性点注入電流の変化(欠相なしの時に1A注入)



変圧器欠相検出の最適と考えられる中性点注入電流の変化(欠相なしの時に10A注入)

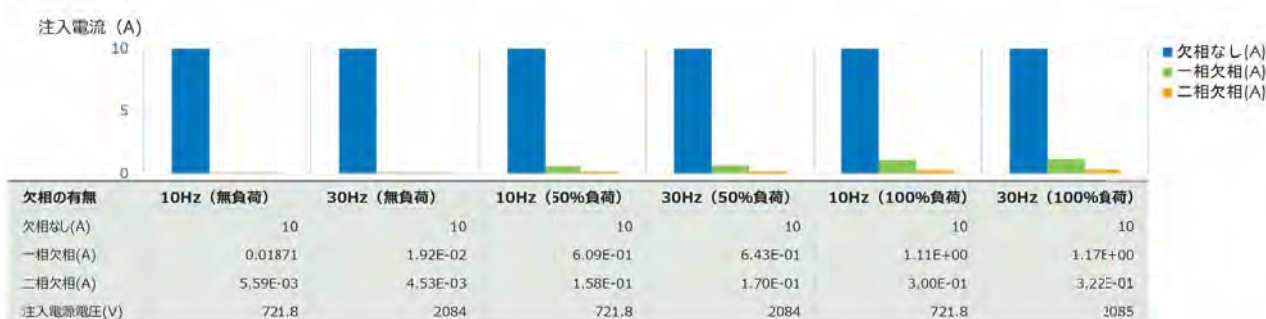


図14 変圧器欠相検出の最適と考えられる中性点注入電流の変化

4. まとめ

- ① EPRIが開発した変圧器中性点から電流を注入することにより、変圧器の一次側欠相を検出する方法の概要を解説した。
- ② INSSは、EPRIが開発した手法を、代表国内PWRで使用されている変圧器のEMTPによるシミュレーションにより、定量的に検証した。その結果、(a)変圧器の負荷によらず、1相欠相あるいは2相欠相の検出は可能である、(b)変圧器の中性点から注入する電流の周波数は、印加電圧を低く抑えられる10~30Hz程度が適切である、(c)注入する電流の大きさは、バックグラウンドノイズの電流に埋没せず、かつ印加電圧が大きくなりすぎない1A~10A程度が適切であり、その範囲の一点の電流、周波数の注入により欠相が検出できる。
- ③ 本解析結果は一事例であり、変圧器個別に解析して、適切な注入電流、周波数を検討する必要がある。

5. 当該手法の実機適用に当たっての懸案事項

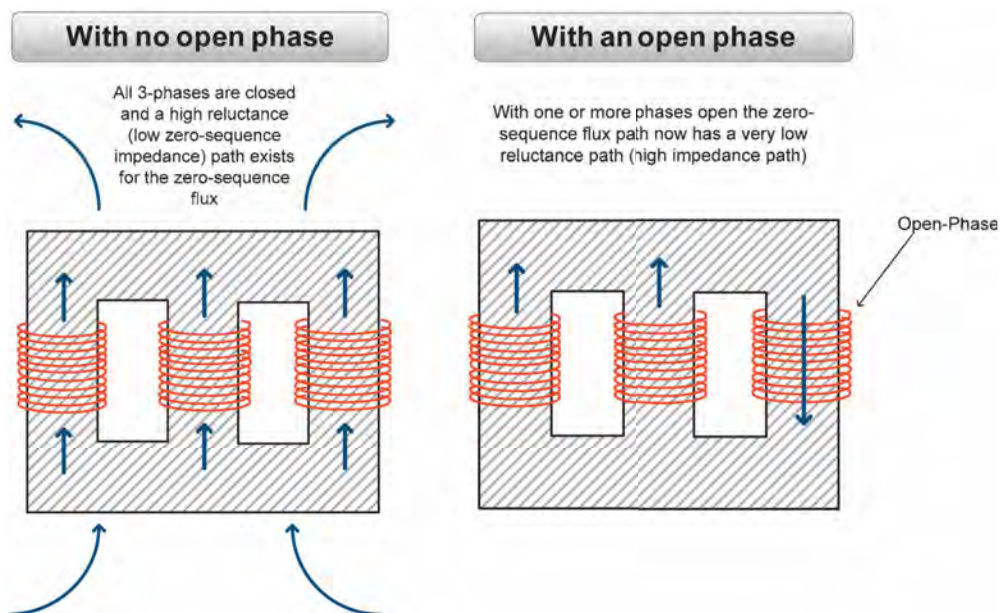
- ① 世界に類例のない新規に考案された装置であり、電気設備技術基準等の基準適合性の検討が必要である。
- ② 発電所側の変圧器から注入した電流は、送電系統を通して変電所側の変圧器から流出するので、送電部門との調整/連携が必要である。
- ③ 通常の電源周波数(60Hz)とは異なる周波数の電流を注入するので、発電所側の変圧器、送電系統、変電所側の変圧器などを包括的にEMTPでシミュレーションして、共振などの異常現象が発生しないことの検証が必要である。
- ④ 欠相後に注入電流が、1桁~2桁と大幅に低下する原理について、EPRIの報告書の内容だけでは、説明できていない。(すなわち、EPRIの報告書では、三脚変圧器についてのみ説明しており、3台の単相変圧器を外部で結線した変圧器(鉄心に

よる磁気的な結合がない場合) についても注入電流が、1桁～2桁大幅に低下するが、その原理が未解明である.)

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, 「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) Mayer, W.S., et al Editors “EMTP Rule Book” Portland, Oregon, Revised 1992. Bonneville Power Administration, System Engineering, 1980.
- (6) 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 (昨年の続報-1)」, INSS JOURNAL, Vol.21, P185 (2014).
- (7) W, Johnson, “Interim Report: EPRI Open-Phase Detection Method,” EPRI, 2014.

付録



欠相時の零相インピーダンスの変化に係る EPRI の報告書の説明図