Osaka University Knowledge Archive

Title	三巻線変圧器の移行サージ解析
Author(s)	園田, 敏雄; 小村, 広司; 柿花, 邦彦
Citation	電気材料技術雑誌. 2004, 13, p. 47-53
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76778
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

三巻線変圧器の移行サージ解析

園田　敏雄、小村　広司、柿花　邦彦

関西電力㈱研究開発室電力技術研究所電力基盤技術研究室（流通）
〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20

Measurement and Analysis for Transfer Voltage and Frequency Characteristics of Transformer

Toshio Sonoda, Koji Omura, Kunihiko Kakihana

Electric power substrate R&D Division(Delivery), Power Engineering R&D Center, Research and Development Department, The Kansai Electric Power Co., Inc.
11-20, Nakoji, 3-Chome, Amagasaki, Hyogo 661-0974, Japan

We have verified accuracy of three-winding transformer model for EMTP by measurement and analysis for transfer voltage and frequency characteristics. By this model, we have taken low cost measures to transfer voltage, which are produced from low voltage winding to high voltage winding by lightning at low voltage side, for three-winding transformer (77/6.6/3.3kV).

KEYWORDS : Three-Winding Transformer, Lightning Surge, Transfer Voltage, Frequency Characteristics
キーワード：三巻線変圧器、雷サージ、移行電圧、周波数特性

１．はじめに

流れ込み式水力発電所の供給方式変更工事（77kV 開閉設備を撤去し、3.3kV 系の水車発電機から直接6.6kV 配電負荷に電力を供給）に伴い、残置して活用を計画している既設の三巻線変圧器（77/6.6/3.3kV）の二次側（77kV）端子が開放端となる。

6.6kV 配電系統から雷サージが侵入した場合に、開放端である三巻線変圧器の二次側（77kV）で、移行電圧により雷インパルス耐電圧試験値（LIWV）を超過する過電圧発生が危惧されたため、設備形成上の問題点有無確認および有効な対策の立案を目的に取り組んだものである。

三巻線変圧器のインパルス電圧移行特性および周波数特性について、ＥＭＴＰおよび高速フーリエ変換（FFT）解析結果と現地実測試験結果との非常に高い精度での一致確認により、解析に用いる三巻線変圧器モデルの妥当性を検証した上で、6.6kV 配電系統から雷サージが侵入した場合の三巻線変圧器の二次側（77kV）への移行サージを解析し、効果的な対策について検討を行ったので報告する。

２．現地実測試験

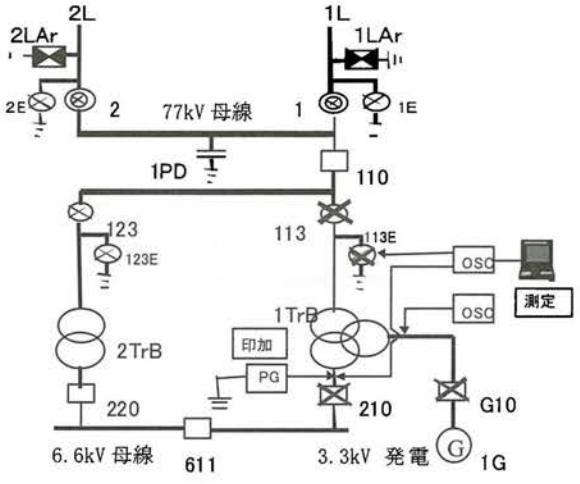
２．１．インパルス電圧移行特性

当該三巻線変圧器(1TrB)の二次側(77kV)，三次側(6.6kV)にインパルス電圧1kV(0.05/70 μs)を印加した時の三巻線変圧器の各部(一次、二次および三次側各端子)における電位分布をディジタルオシロスコープにて現地実測した。

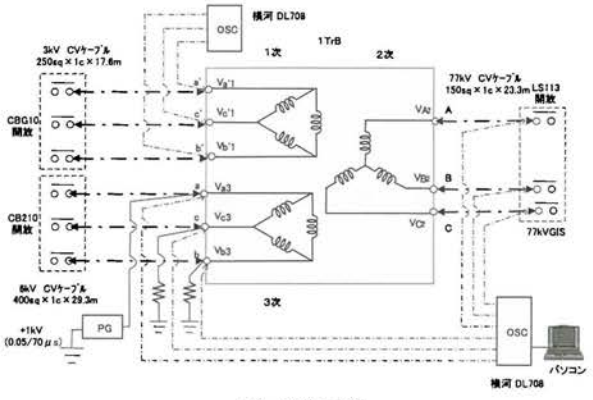
但し、実測に際しては、模擬インパルス電圧発生装置として、波頭長0.05 μs、波尾長70 μs

のパルスジェネレータ（PG）を使用した。

なお、発電所の開閉設備用接地網の電位上昇、あるいは77kV 架空送電線による誘導影響を避けるため、接地網敷設エリアから離隔距離100m地点に遠方接地極を設けた。遠方接地極として設置した電圧極は、電圧プローブアース側で用い、電流極は雷インパルス電圧発生装置（パルスジェネレータ：PG）のＧ端子として用いた。



(a) 単線結線図



(b) 測定回路

図1 試験回路（インパルス電圧移行特性）
Fig.1 Test Circuit
(Transfer Voltage Characteristics)

インパルス電圧移行特性の測定回路を図１に示す。

試験ケースを表１に示す。

変圧器二次側（77kV）ケーブルは、変圧器直結であり、全ての試験ケースにおいて接続状態で測定した。

表1 試験ケース(インパルス電圧移行特性)
Table.1 Cases of Test
(Transfer Voltage Characteristics)

変圧器	電圧波形	印加点	試験ケース	印加相	No.	試験ケース
1TrB	1[kV] (0.05/70 μs)	1TrB3次	変圧器単体	1相(A)	1	TS-1Tr-T1
				2相(A-B)	2	TS-1Tr-T2
				3相(ABC)	3	TS-1Tr-T3
		1TrB3次	変圧器単体	1相(A)	4	TS-1Tr-T1A
				2相(A-B)	5	TS-1Tr-T2A
				3相(ABC)	6	TS-1Tr-T3A
		1TrB3次	変圧器単体	1相(A)	7	TS-1Tr-T1I
				2相(A-B)	8	TS-1Tr-T2I
				3相(ABC)	9	TS-1Tr-T3I
		1TrB3次	変圧器単体+ケーブル(1/3次)	1相(A)	10	TS-1TrCS-T1
				2相(A-B)	11	TS-1TrCS-T2
				3相(ABC)	12	TS-1TrCS-T3

試験ケース TS-1TrCS-T1における測定結果を図２に示す。実測結果から、三次側（6.6kV）へのインパルス電圧1kV 印加により、二次側（77kV）に約1.5kV の電圧移行が生じていることが判る。

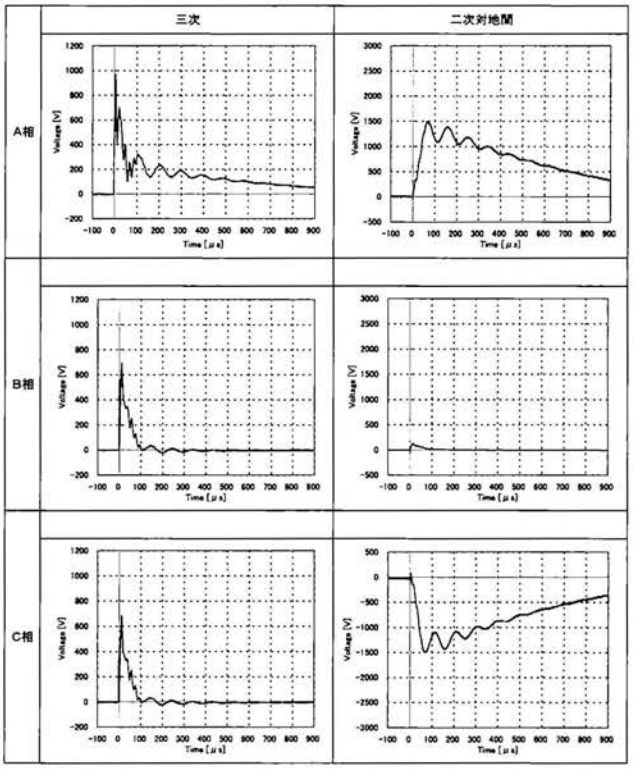


図2 測定結果（ケース TS-1TrCS-T1）
Fig.2 Results of Measurement　(Case TS-1TrCS-T1)

２．２．周波数特性

電圧移行特性と同様に、三巻線変圧器の二次側（77kV）、三次側（6.6kV）に可変周波数電圧30V（50Hz～400kHz）を印加し、三巻線変圧器の各部（二次及び三次側各端子）の応答倍率及び位相差を電圧プローブ及びディジタルオシロ

スコープにて現地実測した。

但し、遠方接地極の電圧極は電圧プローブアース側で用い、電流極は可変周波数電源の出力マイナス側として用いた。

周波数特性の測定回路を図３に示す。試験ケースを表２に示す。

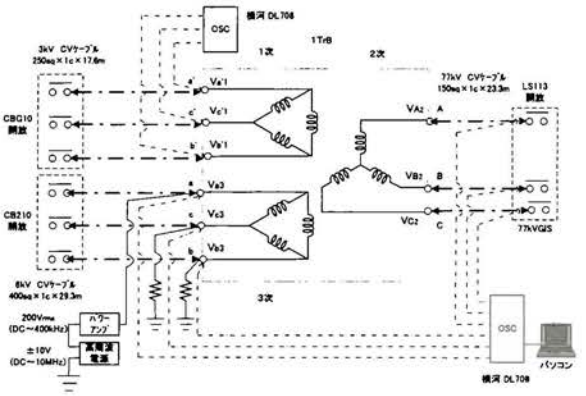


図3 測定回路（周波数特性）
Fig.3 Circuit of Measurement
(Frequency Characteristics)

表2 試験ケース（周波数特性）
Table.2 Cases of Test (Frequency Characteristics)

変圧器	電圧波形	周波数	印加点	測定ケース	印加相	No.	試験ケース
1TrB	正弦波	50～400kHz	1TrB3次	変圧器単体	1相(A)	1	FS-1Tr-T1
					2相(A-B)	2	FS-1Tr-T2
					3相(ABC)	3	FS-1Tr-T3
	正弦波	50～400kHz	1TrB3次	変圧器単体＋ケーブル(1/3次)	1相(A)	4	FS-1TrCS-T1
					2相(A-B)	5	FS-1TrCS-T2
					3相(ABC)	6	FS-1TrCS-T3

試験ケース FS-1TrCS-T1における測定結果を図４に示す。

50Hz～1kHz の周波数領域では、二次側（77kV）A相およびC相において、ほぼ変圧比（6.2=74.23/√3／6.9kV）の応答倍率となっている。

1～10kHz の周波数領域では、応答倍率が減少し、高周波領域では、移行分が少なくなる。

10kHz 以上の周波数領域では、応答倍率が１以下となるが、A相の180kHz 付近では、応答倍率が１となる。

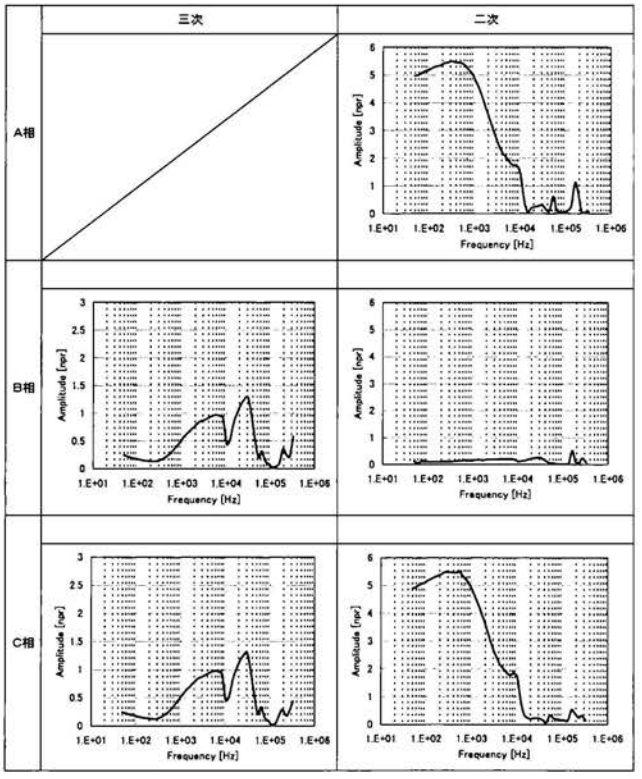


図4 測定結果（ケース FS-1TrCS-T1）
Fig.4 Results of Measurement (Case FS-1TrCS-T1)

３．解析モデルの妥当性検証

３．１．解析モデル

変圧器の移行サージをEMTPにより解析するために、供試三巻線変圧器の試験成績書等を用いて変圧器定数の算出を行った。解析に用いた定数を表３に、解析モデルを図５に示す。なお、変圧器はEMTP Transformer Model(1)により巻数比、巻線抵抗、巻線インダクタンスを模擬し、鉄心の磁化特性は無視した。

表3 解析モデル用定数
Table.3 Characteristic Values of Analysis Model

項　目	定 数	単位
1次巻線抵抗	0.00795	[Ω]
1次巻線インダクタンス	0.237	[mH]
2次巻線抵抗	3.59	[Ω]
2次巻線インダクタンス	187.3	[mH]
3次巻線抵抗	0.0297	[Ω]
3次巻線インダクタンス	0.0124	[mH]
1次対地静電容量	3000	[pF]
2次対地静電容量	1100	[pF]
3次対地静電容量	3200	[pF]
1-2次対地静電容量	170	[pF]
1-3次対地静電容量	830	[pF]
2-3次対地静電容量	1300	[pF]

項　目	定 数	単位
1次ケーブルサージZ	43.7	[Ω]
1次ケーブル伝搬速度	180	[m/μs]
2次ケーブルサージZ	80.4	[Ω]
2次ケーブル伝搬速度	180	[m/μs]
3次ケーブルサージZ	38.2	[Ω]
3次ケーブル伝搬速度	180	[m/μs]

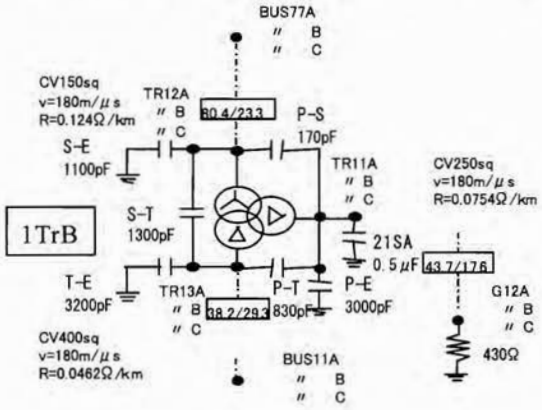


図5 解析モデル
Fig.5 Analysis Model

３．２．ＥＭＴＰ解析結果

前節の解析モデル（図５）を用いてインパルス電圧移行特性について、EMTP 解析を行った結果（ケース TS-1TrCS-T1）を図6に示す。

現地実測結果と EMTP 解析結果を比較すると、一次側（3.3kV）および二次側（77kV）において、両者とも非常に良く一致している。

３．３．ＦＦＴ解析結果

一般に、数値ラプラス（フーリエ）順変換では、サンプリング定理により説明される折り返しの影響により、周波数領域での有効データ数が、時系列データの１／２となることが知られている。

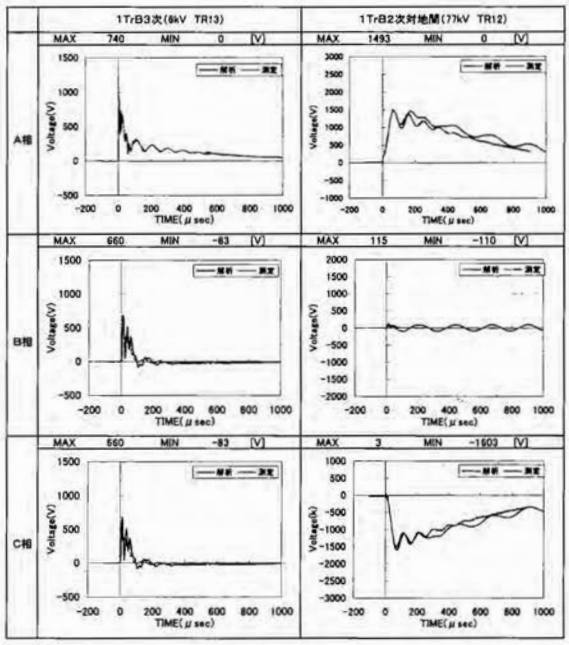
そこで、時系列データの有効利用を図るため、直線近似ラプラス変換（Linear approximated Laplace Transform）を採用した。

直線近似ラプラス変換は、奇数サンプリングの採用により、原理的に折り返し誤差を有さず、実用上でも80%以上のサンプルデータの有効利用が可能である。

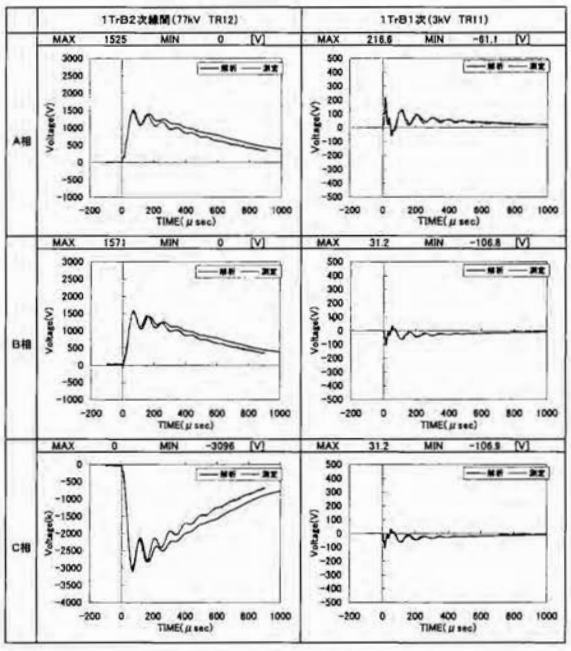
また、逆変換については、直線近似ラプラス変換と良好な変換対をなしている高速ラプラス変換（Fast Laplace Transform）を用いた。

直線近似ラプラス変換および高速ラプラス変換は、FFT アルゴリズムを適用可能であるため、計算速度は FFT の計算速度に準ずるものとなる。

ケース TS-1TrCS-T1の周波数特性解析結果を図７に示す。



(a) 三次・二次対地間電圧



(b) 二次線間・一次対地間電圧

図6 インパルス電圧移行特性解析結果
（ケース TS-1TrCS-T1）
Fig.6 Analysis Results of Transfer Voltage Characteristics

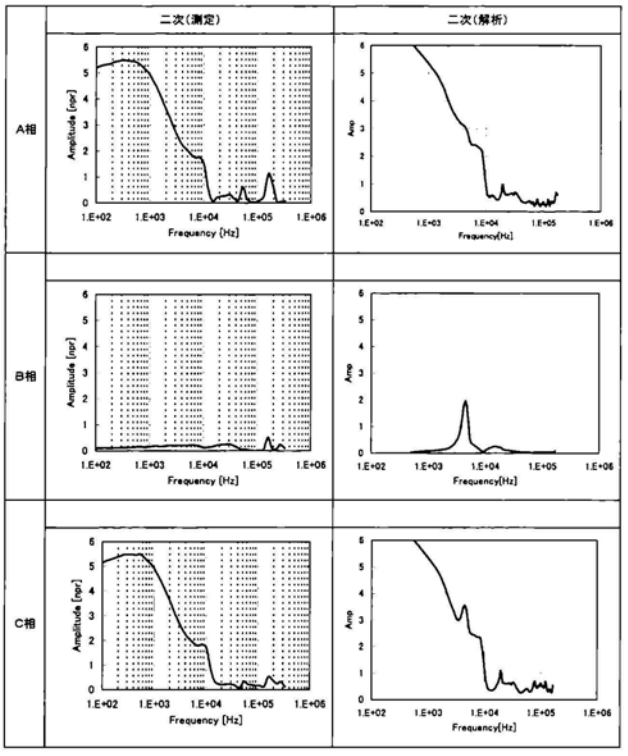


図7 周波数特性解析結果(ケース TS-1TrCS-T1)
Fig.7 Analysis Results of Frequency Characteristics

このように、FFT を行うにあたり測定時間が1ms であるため、これにより算出される基本周波数が1kHz となり、算出できる周波数の最小値は500Hz で限界となり、1kHz 以下では特性が粗くなり正確に表現できない。

周波数特性により解析結果の4.5kHz 付近でＢ相およびＡＣ相にピークのある特性が見られる。これはインパルス電圧移行特性の解析波形に見られる周期200μs の振動成分によるものである。

このように、周波数特性においても、現地実測結果と解析結果が良く一致している。

４．侵入雷サージの影響有無および対策検討

解析に用いる三巻線変圧器モデルの妥当性検証を踏まえ、直配移行後の6.6kV 配電系統からの雷サージ侵入時における三巻線変圧器の二次側（77kV）への移行サージについて、EMTP 解析を実施した。

解析検討に用いた6.6kV 配電線および発電所の解析モデルを図８、９に示す。

なお、雷撃点は6.6kV 配電線 F11の引出し第１柱の塔頂とし、雷撃電流を30kA（20／60μs）とした。

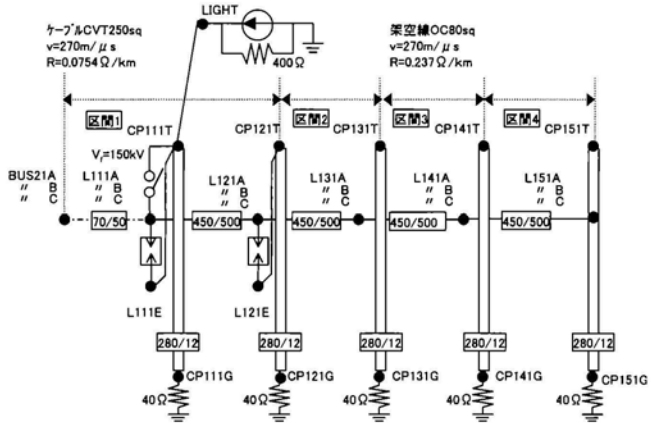


図8 6kV 配電線モデル
Fig.8 Analysis Model of 6kV Distribution Lines

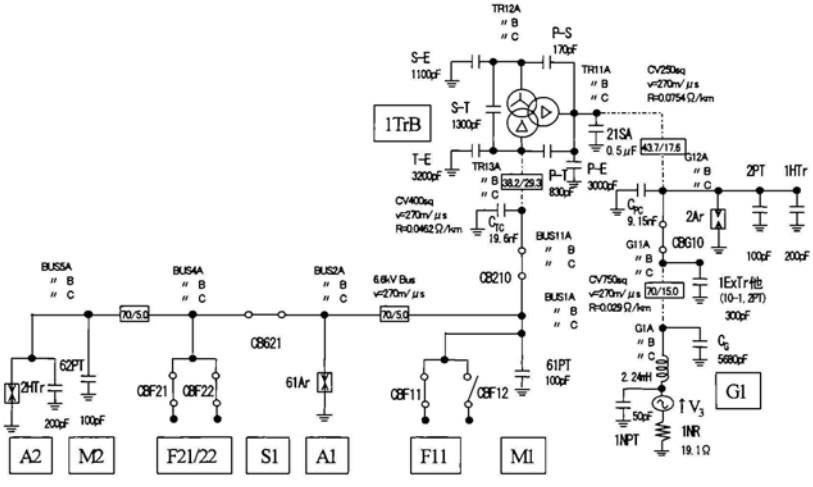


図9 発電所モデル
Fig.9 Analysis Model of Power Station

解析結果を図10に示す。

図10の左図および中図に示すように、雷撃後、配電線避雷器が動作すると共に、配電線より発電所6.6kV 母線に約40kV の雷サージが侵入し、三巻線変圧器の二次側（77kV）線間で設計絶縁耐力440kV を超過する約580kV の移行電圧が発生する。これに伴い三巻線変圧器巻線の絶縁耐力を増強するために、巻き線の巻き替え等の対策を要することが判る。

図10の右図には、三巻線変圧器と77kV 開閉設備の間に設置されている既存の77kVCV ケーブルを77kV 開閉設備撤去後も残置する対策案についての解析結果を示す。

これにより、本対策案を講ずることで、三巻線変圧器の二次側（77kV）への移行電圧は約330kV となり、適正な裕度を保ちつつ、設計耐電圧以内に移行電圧を抑制可能であることが判る。

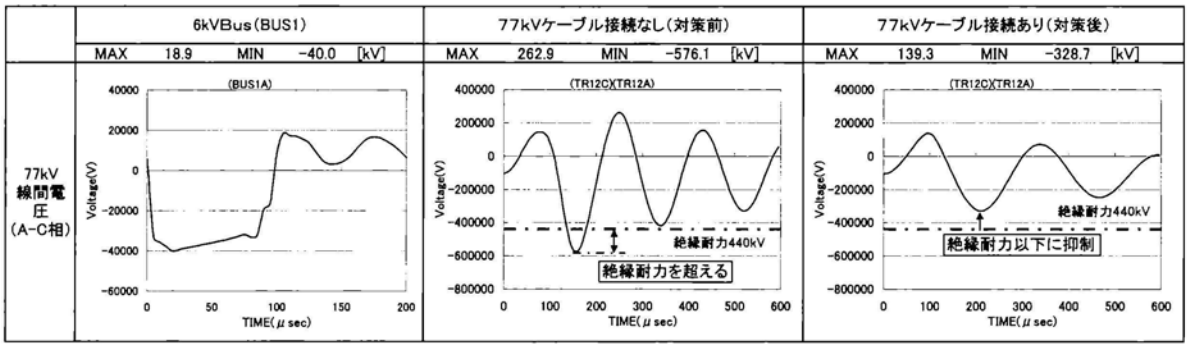


図10 77kV 側への移行電圧解析結果
Fig.10 Analysis Results of Transfer Voltage Characteristics

５．まとめ

三巻線変圧器の移行電圧解析を行うに当たり、解析に用いるモデルの妥当性を検証することを目的として、現地実測試験および EMTP 解析結果の比較を行い、インパルス電圧移行特性および周波数特性が良好に一致していることを確認した。これを基に、6.6kV 配電線から発電所側6.6kV 母線に雷サージが侵入した場合の三巻線変圧器二次側(77kV)への移行サージを解析した。この結果、三次側（6.6kV）に40kV 程度の雷サージ侵入時には、二次側(77kV)線間で設計耐電圧440kV を超過する過電圧が発生するが、二次側(77kV)の既存電力ケーブルを残置することにより、設計耐電圧440kV 以下に抑制することが可能となる。このように、三巻線変圧器についても二巻線変圧器と同様[(2)(3)(4)]に移行電圧特性を解析することができ、現地実測結果と解析結果との比較により、その整合性について、非常に高い精度で両者の一致を確認することができた。

また、今回使用した変圧器モデルは、通常の雷サージ解析においても活用でき、高い精度で移行サージの解析を行うことが可能である。

参　考　文　献

(1) 電気学会：「電力システムの過渡現象とＥＭＴＰ解析」,電学技報 No.872(2002)
(2) 植田，杉本，舟橋，竹内，佐藤，宮城：「周波数特性を考慮した変圧器移行電圧モデルの検討」,電学論文誌 B, Vol.117, No.9, (1997)
(3) 植田，根尾，杉本，舟橋，竹内：「変圧器移行電圧の測定と解析モデルに関する検討」，電学論文誌 B，Vol.115，No.12，(1995)
(4) 園田，柿花：「変圧器移行電圧・周波数特性の測定」,平成15年電気学会全国大会,7-057, (2003)

（2004年6月15日受理）

園　田　敏　雄

1965年7月15日生まれ。84年瀬田工業高校卒業。同年4月関西電力㈱入社。
主として、サージ解析および変電設備の研究に従事。現在、大阪北支店設備計画グループにて設備計画業務に従事。
2002年電気学会論文賞。

柿　花　邦　彦

1955年1月7日生まれ。80年大阪府立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月関西電力㈱入社。
現在に至る。主として変電機器の設備診断に関する研究に従事。電気学会会員。

小　村　広　司

1960年9月24日生まれ。79年島根県立松江工業高校電気科卒業。同年4月関西電力㈱入社。現在に至る。
主として変電設備のサージ解析に関する研究に従事。電気学会会員。