22kV 全ケーブル系統の絶縁設計合理化に向けた過渡過電圧解析

正員 岡 圭介 正員 平井崇夫 正員 村田孝一 (東京電力)
正員 橋本栄二 (電力中央研究所) 正員 有賀保夫 (電力テック)

A Calculation of Transient Overvoltage for Rationalization of Insulation Design of 22kV Cable System

Keisuke Oka, Member, Takao Hirai, Member, Koichi Murata, Member (Tokyo Electric Power Company)
Eiji Hashimoto, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)
Yasuo Ariga, Member (Denryoku Technical Engineering Company)

For a rationalization of insulation design of 22kV cable system, we had calculated transient overvoltages by EMTP. From the result of our investigation on actual conditions of the existing 22kV distribution line, some typical models for the calculation were selected. As a result of parameter analysis by the typical model, we determined the system condition of distribution line that caused the largest transient overvoltage. In the case of switching surge, there is little relationship between neutral resistance and the overvoltage, and then the maximum per unit value of abnormal voltage is approximately 2pu. On the other side, in the case of fault surge, the overvoltage increases as the neutral resistance increases, and then the maximum per unit value of the abnormal voltage becomes 2.68pu. According to the above results, the conventional test voltage for 22kV distribution equipments could be reduced by approximately 20%.

キーワード：絶縁設計，配電線，EMTP，サージ，モデル化

Keywords: insulation design, distribution line, EMTP, surge, modeling

1. まえがき

都市部等の過密地域では，現在の供給方式である 6kV/100・200V 配電方式における供給限界や設備輻輳化を抜本的に解決する供給方策として，22kV/400V 配電方式の導入が期待されており，一部地域において 22kV/400V 直接供給の試験実施等が行われている。22kV/400V 配電方式の普及拡大にあたっては，各種機器の絶縁レベル低減による機材の一層のコストダウンが望まれており，東京電力では都市部での適用が想定される 22kV 全ケーブル系統（架空線・地中線ともケーブルで構成されオープン・ワイヤ区間を含まない系統）における絶縁設計合理化検討を実施している。

配電電圧クラスの絶縁設計思想としては，系統に発生する内部異常電圧に耐えることが基本とされている⁽¹⁾ため，絶縁設計合理化にあたっては，系統の内部異常電圧最大値の正確な想定が重要である。電力系統の過電圧解析ツールとしては，送変電設備の絶縁設計合理化検討⁽²⁾等で実績のある EMTP が知られている。

EMTP の配電電圧クラス内部異常電圧解析への適用例としては，JEC-0102⁽³⁾制定時に 20kV 級地中配電系統の開閉サージについて解析した結果が報告されている⁽¹⁾ものの，国内において実規模の配電系統における実測サージ波形と

の比較により EMTP 解析精度を確認した報告はない。

以上のことから，筆者らは電力中央研究所赤城試験場に建設した実規模試験線路を用いて，22kV 全ケーブル系統の過渡性内部異常電圧の測定を実施し，測定波形と解析波形の比較により，EMTP 解析精度の評価を行い，EMTP を用いて全ケーブル系統における過渡過電圧現象を良好な精度で再現できることを確認した⁽⁴⁾。本論文では，22kV 全ケーブル系統における過渡性内部異常電圧の EMTP パラメータ解析結果から，最大過電圧レベルを想定し，系統の有すべき耐電圧レベルについて検討した結果を報告する。

2. 検討手法

EMTP 過電圧解析を用いた 22kV 全ケーブル系統の絶縁設計合理化検討を行うにあたり，現行試験電圧の算定手法に関する既存の知見や，解析対象とする配電系統モデル等について調査し整理した。以下に結果をまとめる。

<2.1> 試験電圧算定手法 文献(1),(3)によれば，配電電圧クラスにおいては，系統に通常発生する内部異常電圧（開閉過電圧）に耐えることが絶縁協調の基本となっており，これに経過地域の気象条件を加味して，必要に応じて耐雷・耐塩方策を施す手法が一般的であるとされている。系統に生じる内部異常電圧最大値から試験電圧を算定する

方法として文献(1),(5)では、内部異常電圧最大値に安全率を見込んだ開閉過電圧耐電圧値(=SIWV)に、機材の V-t 特性により定まる換算係数を乗じることで、SIWV と等価な雷インパルス耐電圧値(=LIWV)および商用周波耐電圧値(=AC 耐電圧)を算出する手法を用いている。この際に用いる等価換算係数は、SIWV より LIWV を算出する係数が 1/0.78~1/0.83、SIWV から AC 耐電圧を算出する換算係数が 0.6 である。以上の考えを以下に整理する。

- ・内部異常電圧として開閉サージと地絡サージを考慮する。
- ・解析による最大過電圧に他相の影響等を考慮した係数 1.1 を乗じたものを最大発生過電圧とする。
- ・最大発生過電圧に安全係数 15% を見込み、開閉過電圧耐電圧値(SIWV)とする。
- ・SIWV に等価換算係数(=1/0.78)を乗じて雷インパルス試験電圧値を算出する。
- ・SIWV に等価換算係数(=0.6)を乗じて商用周波耐電圧値を算出する。

上記の考えに基づく試験電圧決定フローを図 1 に示す。文献(1)では、22kV 配電系統に生じる内部異常電圧について、「通常の系統においては、一線地絡時の投入サージを含めても最高サージ倍率は 3.6pu 以下、ケーブル・架空混在系統等で特別な回路条件の場合、希に 5.5pu のサージが発生する」としている。この値と図 1 のフローより、高位の LIWV として 150kV、低位の LIWV として 100kV が算出される。これらに加え、制限電圧 94kV 避雷器と組み合わせた時の LIWV=125kV の 3 種が現行の 22kV 配電系統の試験電圧である。

図1 試験電圧算定フロー

Fig.1 Flow chart to calculate test voltage

＜2.2＞ 解析対象系統モデル 過電圧解析を行うにあたり、電力会社における設備実態・運用方式等を調査し、実系統の代表として最も適当と考えられる系統モデルを選定した。以下に概要を記す。

- (1)中性点を抵抗接地する架空・地中全ケーブル系統とする。これにより、間欠弧光地絡等、非接地系固有の現象は考慮しないものとした。

- (2)全ケーブル系統を対象とするため、事故時の再投入運用は考慮せず、また系統中に避雷器は無いものとする。
- (3)架空ケーブル系統の系統構成は分割連系方式、地中ケーブル系統の系統構成は本線・予備線方式およびスポットネットワーク方(=SNW)式を検討対象とする。
- (4)電源インピーダンスの値は、実態調査結果に基づく代表値として 45MVA ベースで 11.5%を採用し、解析プログラムにおいては電源部に 3.9[mH]の集中インダクタンスとして挿入し模擬した。このインダクタンスの値は、文献(1)において地中配電系統の EMTP 解析を行った際に用いた値よりも 30%程度小さいが、集中インダクタンスは透過する進行波の波高値・峻度を減じる作用があるので、開閉サージに対しては過酷側の条件であると考え、この値を用いて合理化検討を行うこととした。
- (5)架空ケーブル系統の B 種接地(電柱接地)は、設備実態調査結果に基づき、表 1 のとおり設定した。解析モデルでは、ブランチ長と接地極間隔・1 極あたり抵抗値から算出した合成抵抗値をケーブルシースの接地抵抗値として用いた。

表 1 電柱接地抵抗値

Table 1 Pole-grounding resistance

線路亘長 (地域例)	接地極 間隔 (m/極)	1極あたり 抵抗値 (Ω)	ブランチ 長(m)	ブランチ あたり 抵抗値(Ω)
0.5km(繁華街)	47.46	20	62.5	15.2
6.0km(住宅地)	56.63	65	750	4.9
30km(農山村)	74.76	65	3750	1.3

- (6)地中ケーブル系統は一般的に各接続部毎に接地極を設けるため、解析モデルでは各接続部(ノード)ごとに 10Ω でシースを接地した。ノード間隔は、亘長 500m モデル=250m、亘長 3km モデル・6km モデル=300m に設定した。
- (7)線路残留電荷は、実系統では負荷により速やかに放電されると考えられ、また高速再投入等の運用も行わないことから残留電荷の影響は考慮しないものとした。
- (8)架空ケーブル系統における変電所引出しケーブル亘長は、設備実態調査結果より 300m に設定した。

図 2 に解析系統モデル図を示す。

図2 解析系統モデル図

Fig.2 Configuration of analytical line

3. 発生最大過電圧想定手法

最大発生過電圧の想定にあたっては、<2.2>で定めた系統モデルについて EMTP パラメータ・スタディを行い各パラメータの最過酷条件を採用した最過酷系統についてランダム・シミュレーションを行い、発生最大過電圧レベルを想定した。

<3.1> 解析条件 解析対象は、全ケーブル系統であるため、線路定数の算出にあたっては、EMTP のサブルーチンである Cable Constants を用いた。Cable Constants に入力した寸法・電気特性データを表 2 に示す。Cable Constants の計算周波数は、サージ進行波の線路伝搬時間（伝搬速度を $170\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定） $\tau(\text{s})$ より、 $f=1/4\tau$ (Hz) として算出した。遮断器投入・地絡故障発生は時間スイッチにより模擬し、投入抵抗、地絡抵抗はともに 0Ω に設定した。その他の条件を表 3 に示す。なお、解析対象過電圧としては、文献(1)で検討された電源遮断器投入時に生じる三相投入サージの他に、一線地絡時に健全相に現れる地絡サージを考慮した。今回、地絡サージを考慮するのは、中性点接地抵抗(以下 NGR と記す)の値によっては、地絡サージの方が三相投入サージよりも過電圧レベルが大きくなるためである。一線地絡再投入サージを考慮しないのは既述のとおりである。

表 3 解析条件

Table 3 Conditions for calculation

線路モデル	Dommelモデル
接地線模擬	$1.0\mu\text{H}/\text{m}$ のインダクタンス
接地線長	架空線: 12m 地中線: 2m
変電所インピーダンス	$3.937[\text{mH}]$
線路残留電荷	考慮しない
大地抵抗率	$100[\Omega \cdot \text{m}]$
計算周波数	$1/4\tau$ (τ = サージ伝搬時間)

<3.2> 解析パラメータ 主なパラメータとして以下の 6 種類を設定した。

- ①投入位相 ②地絡位置 ③中性点接地抵抗値
④分岐数 ⑤線路互長 ⑥並列回線数

なお、SNW 系統については投入時の系統形態が本・予備系統と同様であるため地絡サージのみ検討し、また並列回線数・互長についても線路による違いは少ないと考え、 $3\text{cct} \cdot 3.0\text{km}$ 一定とした。

パラメータスタディにおいては、あるパラメータについて検討する際は、他のパラメータは標準値に固定して解析を行い、各ケースにおける過酷条件を組み合わせた系統を最終的な最過酷系統とした。この最過酷系統に対して EMTP の統計処理スイッチを用いたランダムシミュレーションを行い、系統の最大発生過電圧を求めた。各パラメータの設定値を表 4 に示す。

表 4 解析パラメータ

Table 4 Parameter for calculation

投入位相(deg)	$-60^\circ \sim +60^\circ$ (※下記参照)
地絡位置	始端, 中央, 末端
中性点接地抵抗値	$5\Omega, 50\Omega, 500\Omega$
分岐数	なし, 3, 7
線路互長	架空: $0.5\text{km}, 6.0\text{km}, 30\text{km}$ 地中: $0.5\text{km}, 3.0\text{km}, 6.0\text{km}$
並列回線数	$1\text{cct}, 4\text{cct}, 9\text{cct}$ (SNWは3cct)
※R相を基準として電源電圧をcos関数で表した時の位相角度	

※下線=各パラメータの標準値

4. 過電圧解析結果

EMTP 解析を行い各パラメータと開閉サージ・地絡サージとの相関を分析した結果について以下にまとめる。

<4.1> 投入・地絡位相と過電圧倍数の関係 スイッチの投入位相と過電圧倍数の相関を図 3～図 7 に示す。図より、開閉サージにおいては投入位相 0° で最も過電圧倍数

表 2 Cable Constants 入力データ

Table 2 Data inputted into Cable Constants

種 類		22kV架空ケーブル		22kV地中ケーブル		
項 目		CCA100	HCCA200	CVT150	CVT250	CVT325
導体 内半径	$r1(\text{mm})$	0.0	←	←	←	←
〃 外半径	$r2(\text{mm})$	6.00	8.50	7.35	9.50	10.85
シース内半径	$r3(\text{mm})$	12.85	15.35	14.20	16.35	17.70
〃 外半径	$r4(\text{mm})$	13.85	16.35	14.30	16.45	17.80
鎧装 内半径	$r5(\text{mm})$	—	—	18.00	20.00	21.50
導体固有抵抗率	$\rho_c(\Omega \cdot \text{m})$	$1.732\text{E}-8$	←	←	←	←
〃 比透磁率	μ_c	1.0	←	←	←	←
絶縁物比透磁率	μ_1	1.0	←	←	←	←
〃 比誘電率	ϵ_1	2.3	←	←	←	←
シース固有抵抗率	$\rho_s(\Omega \cdot \text{m})$	$2.825\text{E}-8$	←	$1.732\text{E}-8$	←	←
〃 比透磁率	μ_s	1.0	←	←	←	←
絶縁物比透磁率	μ_2	—	—	1.0	←	←
〃 比誘電率	ϵ_2	—	—	4.0	←	←

が大きくなった。これは、投入位相 0° の時にスイッチ極間電圧が最大となるためである。一方、地絡サージにおいては、地絡位相 20° で最大過電圧が発生した。これは、これは健全相対地電圧が交流電圧波高値に向けて上昇する振幅に、系統固有の減衰過渡振動が重畳したサージ電圧波高値が地絡位相 20° 付近で極大となるためである。R 相地絡時の健全相(T 相)地絡サージ波形解析例を図 8 に示す。

以降のスイッチ投入位相以外のパラメータ解析に際しては、スイッチ投入位相を開閉サージ $= 0^\circ$ 、地絡サージ 20° に固定して計算を行った。

図 3 投入位相と開閉過電圧倍数 (架空)

Fig.3 Relation between closing phase and switching surge level (in case of overhead cable line)

図 4 投入位相と開閉過電圧倍数 (地中)

Fig.4 Relation between closing phase and switching surge level (in case of underground cable line)

図 5 地絡位相と地絡過渡過電圧倍数 (架空)

Fig.5 Relation between faulting phase and fault surge level (in case of overhead cable line)

図 6 地絡位相と地絡過渡過電圧倍数 (地中)

Fig.6 Relation between faulting phase and fault surge level (in case of underground cable line)

図 7 地絡位相と地絡過渡過電圧倍数 (SNW)

Fig.7 Relation between faulting phase and fault surge level (in case of underground SNW cable line)

図 8 地絡サージ解析波形に対する地絡位相の影響

Fig.8 Influence of fault phase angle on waveform of fault surge

<4.2> 開閉サージと各パラメータの相関

(1)中性点接地抵抗 中性点接地抵抗値によらず開閉サージの過電圧倍数は概ね 2pu であった。

(2)分岐数 分岐数によらず開閉サージの過電圧倍数は概ね 2pu であった。

(3)並列回線数 並列回線数が 4 回線の時に過電圧倍数が極小となる傾向であった(図 9 参照)。これは線路固有の減衰過渡振動に他回線からの反射波が重畳するため、減衰過渡振動と反射波の取り合いにより、4 回線のケースで極小値が現れたと考えられる。回線数ごとの解析波形の

比較例を図 10 に示す。

(4)線路互長 互長 500m のケースで 2pu 程度の過電圧倍数が生じ、互長が増加するにしたがい過電圧倍数は漸減傾向を示した。

図 9 並列回線数と開閉過電圧倍数

Fig.9 Relation between number of parallel lines and switching surge level

図 10 開閉サージ解析波形に対する並列回線の影響

Fig.10 Influence of parallel lines on waveform of switching surge

<4.3> 地絡サージと各パラメータの相関

(1)中性点接地抵抗 中性点接地抵抗値の増加に伴い地絡サージ過電圧倍数も増加傾向を示した(図 11 参照)。これは地絡相に、NGR を含む閉回路が大地を介して形成され、NGR を流れる地絡電流により中性点電位が上昇するためである。

(2)分岐数 分岐数によらず地絡サージの過電圧倍数は概ね 2.3pu であった。

(3)並列回線数 並列回線数が 4 回線の時に架空系統の地絡サージが僅かに大きくなったが、その他のケースを含めて過電圧倍数は概ね 2.3~2.4pu であった。

(4)線路互長 互長が増加するにしたがい過電圧倍数は増加傾向を示した(図 12)。これは、互長が短互長のケース(500m)においては、線路固有の過渡振動波高値が他のケースと比較して低く、減衰時定数も小さいためである。互長ごとの解析波形の比較例を図 13 に示す。

(5)地絡位置 始端地絡のケースが他のケースに較べて過電圧倍数が大となる傾向であった(図 14)。これは始端地絡の場合、地絡回路に線路インピーダンスが含まれないため NGR を流れる事故電流が大となり、中性点電位がより高くなるためである。

図 11 中性点接地抵抗値と地絡過渡過電圧倍数

Fig.11 Relation between neutral resistance and fault surge level

図 12 互長と地絡過渡過電圧倍数

Fig.12 Relation between cable length and fault surge level

図 13 地絡サージ解析波形に対する線路互長の影響

Fig.13 Influence of cable length on waveform of fault surge

図 14 地絡位置と地絡過渡過電圧倍数

Fig.14 Relation between faulting point in cable line and fault surge level

<4.4> 最過酷条件 各パラメータの影響は、架空・地中で大きな差異はなかったが、並列回線数や亘長等、開閉サージと地絡サージで過酷側条件が相反するパラメータもあったので、開閉サージ・地絡サージそれぞれについて最過酷系統条件を抽出した。パラメータ解析の結果選定された最過酷系統条件について表 5,6 にまとめる。

表 5 最過酷条件(開閉サージ)
Table 5 Severest condition for switching surge

架空／地中区分	架空・地中
中性点接地抵抗値	*****
分岐数	*****
亘長	0.5km
並列回線数	1cct
最大サージ倍数	2.05 pu

※表中の*****はパラメータ間に差がないことを示す。

表 6 最過酷条件(地絡サージ)
Table 6 Severest condition for fault surge

架空／地中区分	架空
中性点接地抵抗値	500Ω
分岐数	7分岐
亘長	30km
並列回線数	4cct
最大サージ倍数	2.68 pu

<4.5> ランダム・シミュレーション パラメータ・スタディより得られた開閉サージ・地絡サージそれぞれの最過酷系統に対して、スイッチ投入時刻を目標投入時刻に対して 0.1ms の標準偏差でバラつかせてランダム投入するシミュレーションを 50 回実施した。上記シミュレーションによる最大過電圧と NGR の関係を図 15 に示す。図 15 より、NGR が 10Ω 以下の場合、最大過電圧倍数は開閉(投入)サージで決定され、その値は NGR によらずほぼ 2.0(pu)である。一方、NGR が 10Ω を越えると最大過電圧倍数に対しては地絡サージが支配的となり、NGR の増加につれて過電圧倍数も上昇し、NGR が 500Ω で最大値 2.68(pu)が発生する。なお、図 15 では地中系統の地絡サージが架空系統より小となる傾向であるが、これは地中系統の亘長設定値が架空よりも短いことによる(図 12 参照)。

5. 必要耐電圧の算定

最過酷系統に対するランダムシミュレーションの結果、内部異常電圧最大値を 2.0~2.68(pu)と想定することができた。この値と図 1 の試験電圧算定フローより求まる必要耐電圧値は、LIWV=60~78kV、商用周波耐電圧値=28~37kV となる。現在の JEC-0102 における 22kV 系統の試験電圧は、LIWV=100・125・150kV(3 区分)、商用周波耐電圧=50kV であるので、全ケーブル系統且つ地絡時再投入運用無しという系統要件であれば、500Ω という高抵抗接地系であっても、現行試験電圧の 20%以上の低減が可能である。

図 15 中性点接地抵抗と過電圧倍数

Fig.15 Relation between neutral resistance and overvoltage level

6. まとめ

実系統の調査により選定した解析パラメータに基づく 22kV 全ケーブル系統の EMTP 過渡過電圧解析を実施し、必要耐電圧の検討を行った。主な結果を以下に記す。

- (1)過渡性内部異常電圧として開閉サージと地絡サージを考慮して解析した結果、系統に生じる最大過電圧レベルは、NGR が 10Ω 以下では開閉サージにより決定される 2.0pu であるが、10Ω を超過すると地絡サージが支配的となり、NGR が上昇するにつれて過電圧レベルも上昇し、NGR=500Ω で最大値 2.68pu が発生する。
 - (2)現在の試験電圧を導出した手法に則り、上記過電圧に対する必要耐電圧を算出すると、雷インパルス試験電圧値=60~78kV、商用周波耐電圧値=28~37kV となり、現行の試験電圧よりも 20%以上低い値を選定しうる。
- 終わりに、本研究の実施にあたり、ご指導、ご支援を賜りました電力中央研究所常務理事鈴木俊男氏に深甚なる感謝の意を表します。

(平成 13 年 7 月 26 日受付、平成 13 年 12 月 26 日再受付)

文献

- (1)電気学会：「試験電圧の考え方と過電圧」，電気学会技術報告，第 517 号，1994 年 11 月
- (2)電気協同研究会：「絶縁設計の合理化」，電気協同研究，第 44 巻第 3 号，昭和 63 年 12 月
- (3)電気学会：「試験電圧標準」，電気規格調査会標準規格，JEC-0102，1994 年
- (4)平井他：「22kV 全ケーブル系統における過渡性過電圧の実測および解析」，平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.440
- (5)電気学会：「試験電圧と機器の絶縁に関する諸特性」，電気学会技術報告，第 518 号，1994 年 11 月

岡 圭介

(正員) 昭和 41 年 3 月神奈川大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東京電力(株)入社。主として配電関係業務及び配電方式・接地方式に関わる研究に従事。現在、東京電力(株)理事配電部担任。

平井 崇夫

(正員) 平成 3 年 3 月早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。同年 4 月、東京電力(株)入社。現在、電力技術研究所所属。主として配電系統の雷観測・サージ解析に関する研究に従事。

村田 孝一

(正員) 昭和 62 年 3 月慶應義塾大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。主として配電機材開発に従事。現在、配電部配電技術グループに勤務。

橋本 栄二

(正員) 昭和 44 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月、(財)電力中央研究所入所。現在、同所狛江研究所副所長。主として電力品質・電気利用に関する研究に従事。平成 8 年科学技術長官奨励賞受賞。

有賀 保夫

(正員) 昭和 37 年 4 月(財)電力中央研究所入所, 昭和 42 年 3 月東京電機大学電機工学科卒業。現在,(株)電力テック出向(同所狛江研究所需要家システム部上席研究員)。主として配電線搬送, 配電系統に関する研究に従事。