配電系統におけるサージ現象とシミュレーション技術

正 員 雨 谷 昭 弘 (同志社大)

Surge Phenomena and Simulation Methods in Distribution Systems

Akihiro Ametani, Member (Doshisha University)

This paper discusses characteristics of a transient and difficulties of its simulation, and presents modeling and simulation examples on a low-voltage system including a distribution system. A transmission system is expressed as a line between a generator station and a substation. On the contrary, a distribution is characterized as a surface on which there are a number of circuit elements and short lines. Thus, the time period of the transient is rather small and the frequency range is high. The characteristic requires an accurate modeling of a circuit element in a high frequency region in general. The modeling itself is principally the same as that in a transmission system, but its parameter is not easily determined because its rating and characteristic are not generally available.

キーワード：配電システム，低圧回路，サージ，シミュレーション，模擬法

Keywords: distribution system, low voltage circuit, surge, simulation, modeling

1. 緒 言

電力システムにおける技術開発は 1000 kV 級 UHV 送電あるいは ± 500 kVHVDC 送電のような超高圧大容量を対象とした分野から，規制緩和に関連する小容量分散電源の連係技術，既存設備の効率的運用のための FACTS 技術・応用等の分野へと移行しつつある。電力会社における営業分野の強化，お客様対応部署等の設置も，電力システムの技術動向の背景にある社会・経済動向から見れば軌を一にしている。電圧階級という指標から見れば，1950 年代/275 kV，1970 年代/550 kV，1990 年代/1100 kV と上昇し続けてきたものが，2000 年代に入り，200 kV 以下の電圧階級での電力系統－配電系統へと技術開発あるいは投資の重点が移行しつつあると言える。例えば電力設備・機器の絶縁設計・協調は 154 kV 以上の系統に関しては 1994 年制定の JEC-102「試験電圧標準」に見られるように一定の合理化を達成したといえるが，154 kV 以下の系統における電力設備・機器の絶縁設計・協調の合理化は今後の検討課題である^{(1)~(3)}。また既存配電線の昇圧運用⁽⁴⁾，需要家レベルでの 100/200 V から 200/400 V への昇圧，最近のエレクトロニクス/デジタル機器の広汎な利用に伴う電磁環境 (EMC) 問題等はいずれも配電系統－需要家での技術課題であり，これらの分野における新技術の開発，既存技術の改良等に関する研究が注目を集めている。

このような背景から，電力系統や配電系統で発生するサージ現象の測定や解析技術に関連する研究成果を取りまとめた本特集が刊行されることとなった。本特集には，家屋

を対象とした雷サージ様相の実験，雷過電圧の抑制策に関する検討，また配電線の架空地線と接地抵抗の関連，接地抵抗の土中放電特性の検討，その動特性モデルを用いた雷サージ解析等の雷サージに関わる研究成果，および変圧器での VFT (Very Fast Transient) サージ，巻線の高周波モデル，VCB の裁断現象に関する論文等が掲載されている。

本稿では，配電系統あるいは一般的に低圧系統・回路でのサージ解析の特異性およびモデル化手法・解析例について述べる。

2. 低圧系におけるサージ解析の特異性

配電系統は送電系統に比して回路構成がはるかに複雑かつ大規模 (ノード・ブランチ数大) で，送電線・変電所系統でのサージ解析モデル^{(5)~(7)}を直接適用するには問題がある。更に，配電系統でのサージは送電系統と異なり，いわゆる移行サージの形態を主としており^{(8)~(12)}，2 次的なサージ現象と言える。これは発・変電所における低圧側制御回路でのサージと類似しているが⁽⁸⁾⁽¹¹⁾，現象そのものが十分には解明されておらず，以下に述べるような特異性を有している。

〈2・1〉 線路・支持物

- ・線路長小：送電線に比して配電線線路長・鉄塔 (電柱) 間隔共に極めて小，ビル・屋内配線，低圧制御回路等では更に小。垂直，水平配置あるいは斜行等種々雑多であり，また回線数も 1 回線とは限らない。
- ・非対称線路構造：配電線では垂直・水平 3 相/1・2 回

線、かつ架空地線・共通中性線有。低圧配電線では2相3線、3相4線式等により非対称構造のため線路定数計算煩雑。建築物の屋内配線および接地に利用される鉄筋は垂直・水平・直交・斜行と多種多様。特にビル等の大規模建築物ではマトリクス状の導体系構成⁽¹³⁾。また、IEC-1312-1 (1995) ではビル鉄筋と接地線は可能な限りボンディングすることが推奨されており⁽¹⁴⁾、サージ解析に際して要注意。

- ・支持物：鉄筋・鋼管コンクリート柱、木柱等サージインピーダンス計算厄介、接地線が電柱に沿って引き下されている場合には、そのサージインピーダンスを用いる必要有⁽¹⁵⁾。

〈2・2〉 接 地 系

- ・低圧系では線路長と接地線長同一オーダーのため接地線考慮要。
- ・発電所低圧制御回路では接地網・埋設地線から制御線・ケーブルへのサージ誘導有り、従って両者を併せた多相分布定数線路の取り扱い必要⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。
- ・大規模建築物では鉄筋構造物が接地系の一部となっており、避雷針接地電極、ビル内機器接地等の接続配慮要、サージ侵入形態によっては両者間に電位差発生⁽¹⁶⁾。
- ・基本的に接地系はサージが発生している間は、零電位として扱えない。配電系の変圧器・避雷器接地点、共通中性線、需要家引込み口中性線等の取り扱いを含め配慮要。

〈2・3〉 負 荷

- ・受電端電圧・電流位相差と振幅比で定まるインピーダンス模擬、サージ過電圧最大値を求めるには開放端（負荷無）模擬が一般的。
- ・負荷でのサージ過電圧を対象とする場合には負荷の周波数特性に対応するモデル回路作成要。
- ・回転機（洗濯機、冷蔵庫等）の場合動作時・停止時の差異、直流・可変周波数電源利用機器（テレビ、エアコン等）の電源部半導体（パワエレ）回路には注意要。

〈2・4〉 サージ侵入経路 配電系、需要家および低圧制御回路共通に次の2種のサージ侵入経路が挙げられる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

- (1) 変圧器、PT、CT等を経由して高圧回路から侵入。
 - (2) 高圧系での避雷器放電電流等による接地系電位上昇および電流による電磁誘導。
- ・変圧器モデルはEMTP⁽¹⁷⁾に内蔵されているが、低圧配電用変圧器はV結線等送電用とは異なる結線方式⁽¹⁸⁾。
 - ・数10 kHz以上の高周波成分を含むサージの場合、巻線間・巻線-ケーシング/コア間浮遊容量模擬要⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁹⁾。
 - ・PT、CTは原理的には変圧器と同じであるが、構造

の差異等により小電流でも非線形特性を示すこと、および回路定数が異なることに注意要。

3. モデル化手法とシミュレーション例

〈3・1〉 埋設地線から架空導体への誘導サージ 高圧系から低圧系へのサージ侵入経路の一つである接地系からの回り込みの一例について説明する。図1(a)に示す地中の埋設地線と架空導体からなる系で、例えば高圧系の変圧器（変電所あるいは柱上）保護用避雷器が雷サージ電圧により動作し、接地系に流入したサージ電流により制御線へサージが誘導される場合を想定している。埋設地線始端から見た接地抵抗としてはSundeの理論式⁽²⁰⁾等が良く知られているが、地中裸導体の直列インピーダンス、並列アドミタンス理論式は存在しない。従って、EMTPの定数計算プログラムCABLE CONSTANTS (CC)/PARAMETERS (CP)⁽²¹⁾にも地中裸導体のオプションは用意されていない。最も簡便な模擬法は図1(b)のように埋設地線を微小距離毎に地中絶縁導体と接地抵抗相当のコンダクタンスで表現する手法であろう⁽²²⁾⁽²³⁾。ここで、地中絶縁導体のインピーダンス、アドミタンスはCC/CPで直ちに計算される。また架空導体も同じである。地中/架空導体間の相互インピーダンスはCPで架空線高 h を正(+)値、地中導体埋設深さ h を負(-)値で入力することにより与えられる⁽²⁴⁾。以上3種の合成により地中/架空導体系のイン

図1 埋設地線から架空線への誘導サージ
Fig. 1. Induced surge to an overhead conductor from a counter poise.

ピーダンス、アドミタンス行列が得られ、例えば π 形集中定数によるモデル回路が得られる。このモデル回路による EMTP シミュレーション結果と実測結果の比較を図 1(c) に示す⁽²⁵⁾。両者は良好に一致している。

以上は架空裸導体の場合であるが、金属シース付ケーブルの場合にもこれを架空ケーブルとして CC/CP で定数計算を行うことにより全く同様に扱える⁽²⁶⁾。また変電所における接地網の場合にも、これを多数の埋設地線の組合せとすることで上記と同様にシミュレーションできる。

〈3・2〉 ビル雷撃時のサージ電圧 まずビル等建築物で用いられる L あるいは H 形等の鉄骨におけるサージ伝搬特性について述べる。図 2 に長さ 2.4 m の L 形鉄骨を地上高 2.6 m の位置に設置しパルス発生器 (PG) より立上り時間 3 ns, パルス巾 1 μ s の単位関数状電圧を印加した時の始端電圧・電流の実験結果を実線で示す⁽²⁷⁾。L 形鉄骨を文献(27)に示す手法で等価円筒アルミ導体で模擬した時の EMTP シミュレーション結果を一点鎖線で図中に示す。なお、図中点線は L 形鉄骨サージインピーダンスの測定結果 (275 Ω) を用いた時のシミュレーション結果である。図より、L 形導体を円筒状導体で模擬し得ること、また鉄鋼 (比透磁率 $\mu_r \gg 1$) 導体をアルミ ($\mu_r = 1$) 導体で模擬し得ることが明らかである。これは表皮効果により電流は導体表面にのみ分布し、波形伝搬特性が導体内部の物理定数 (抵抗率, 透磁率) にあまり影響されないため

図 2 L 形鉄骨でのサージ波形

Fig. 2. Surge waveforms on an L-shaped steel frame.

図 3 ビル縮小モデル

Fig. 3. A scaled-down model of a building.

と考えられる。以上は H 形, $\square$ 形鉄骨等でも同様である。

次に、ビル等建築物の避雷針あるいは鉄筋構造体に雷撃があった場合のビル各フロアでのサージについて図 3 に示す 1/10 縮小モデルにおける実験結果について説明する⁽¹⁶⁾。図 3 は 3 階建てビルを模擬しており、鉄筋は先の検討結果に基づき柱を半径 70 mm, 梁を半径 30 mm の銅パイプで構成している。図 4(a)~(c) に避雷針, 鉄筋, ビル内 IT 機器三者の接地方式の相違による各フロアでのサージ電圧を示す。IEC 規格によればビル内機器の接地線は可能な限りボンディングすることになっており⁽¹⁴⁾, 図 4(b) がこれに該当する。図より、IEC 規格に従って三者の接地を各部でボンディングした場合、各フロア電圧は小となるのが明らかである。なお、ビル鉄筋で避雷針を代替するのは不適當であると言える。

〈3・3〉 低圧配電系でのサージ 配電系で多数の電柱

図 4 ビル雷撃時のサージ電圧波形

Fig. 4. Surge voltage waveforms due to lightning to a building.

(接地抵抗)を対象とするサージ解析でノードおよびブランチ数が膨大となる場合には分布アドミタンスモデルを用いることで均質線路として模擬すればよい⁽¹⁸⁾⁽²¹⁾。低圧配電用変圧器では、低圧側に中性線があるので、V結線の場合でも低圧側は3導体線路となる。なお、共用中性線では避雷器動作に伴う放電電流が流入し、中性線の電位上昇を生ずると共に電力線へ静電電磁誘導によるサージを発生することもある⁽²⁸⁾。これは低圧制御回路での接地系からのサージと同じ現象である。

配電線1相に雷サージが侵入した場合、当該相電圧は各電柱で変圧器の配置・設置数に拘わらずほぼ一定であるが、誘導相電圧は大きく異なり、設置数に比例して大となる傾向にある。需要家端電圧は無負荷（開放端）時に最大となり、負荷接続により30%程度にまで低下する^{(18),(29)}。

〈3・4〉 家電機器 一般に回路構成・結線が不明な機器のモデル回路作成はそのインピーダンス周波数応答を測定し、これに対応するR, L, C回路を合成することに帰着する。

図5(a)に扇風機（微風運転状態）について可変周波数交流電源による周波数応答測定結果を示す⁽³⁰⁾。図の共振特性のみに注目し、リアクタンス定理を用いてモデル回路を作成するとRLC直列あるいはL-R//Cモデル回路が得られるが、反共振特性は当然のこと乍ら模擬できない。従って、更に回路素子を追加する必要がある。その一例を図5(b)に、またその周波数応答を図5(c)に示す。このモデル回路によれば反共振特性も模擬できていることがわかる。

図5(a)の周波数応答はモータを有するファンあるいはドライヤー等でも同様である⁽²⁹⁾。なお、可変周波数交流電源は容量が小で、かつ最大周波数も図5(a)に示すように高々数10 kHz程度であり、雷サージ解析等に用いるモデル回路作成のための周波数応答を得るのは一般に困難である。このような場合には単位関数電圧波形あるいはインパルス電圧波形等を印加した時の時間応答から数値フーリエ・ラプラス順逆変換を用いて周波数応答を求めればよい。

放電現象を応用した蛍光灯（放電ランプ）や非連続動作を基本とする半導体素子等のモデルは非線形素子を含む回路となる。これらはEMTP-TACS, MODELSを用いることで容易にモデル化できる。その例題および詳細については文献(31)～(33)を参照されたい。なお、そのパラメータ決定にはニューラルネットワーク、遺伝子アルゴリズムあるいは社会統計的手法（SAS）等が有用である。

4. 結 言

本稿では配電系統を含む低圧回路でのサージ現象およびシミュレーションの特異性、およびモデル回路例等について説明した。

低圧回路の各種素子はその構造・物理定数等のデータがあまり知られておらず、一般的なモデル回路は確立されて

(a) 実測結果

(b) モデル回路

(c) シミュレーション結果

図5 扇風機の周波数応答

Fig. 5. Frequency response of an electric fan.

いないのが現状であろう。従って、各事例毎に実験データあるいはカタログデータ等に基づきモデル回路を作成せざるを得ない。しかし、モデル回路が得られれば電気回路としては通常の電力系統と同一であり、EMTP等のシミュレーションツールを直ちに適用できる。

昨今の規制緩和等の政治・経済動向、EMC問題等の社会動向、さらにエレクトロニクス/デジタル機器の飛躍的発展・利用およびIT化の技術動向からすれば配電系を含む低圧回路のサージ現象および解析は今後ますます重要になるものと予想され、本特集がその一助となれば幸いである。

(平成14年6月30日受付)

文 献

- (1) 「試験電圧標準」, JEC-0102-1994, 電気学会
- (2) 「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, 44巻, 3号 (1988-12)
- (3) 「内外の絶縁協調技術の現状と今後の方向性」, 電気技報, 近日中発刊予定

- (4) 岡, 他: 「11.4 kV 実規模配電線路における過渡性過電圧の測定と解析」, 電学論 B, **122**, 5, p. 667 (2002-5)
- (5) 「電力系統・設備のシミュレーション技術」, 電気協同研究, **51**, no. 4 (1996-3)
- (6) 雨谷 (編著): 「電力システムのパソコンシミュレーション」, オーム別冊 (1998-9)
- (7) 「電力システムの過渡現象と EMTP 解析」, 電学技報, No. 872 (2002-3)
- (8) 横倉・大島: 「電子機器への移行サージとその対策」, 電学誌, **108**, 5, p. 381 (1998-5)
- (9) 植田, 他: 「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 B, **117**, 9, p. 1294 (1997-9)
- (10) 「ガス絶縁開閉装置における低圧側への誘導現象」, 電学技報, No. 273 (1998)
- (11) 林田, 他: 「変電所における低圧側制御回路に発生する過電圧の実験的検討」, 電学論 B, **117**, 7, p. 1039 (1997-7)
- (12) 園田, 他: 「変電所埋設地線から低圧制御回路へのサージ誘導試験」, 電学研資, HV-01-129 (2001)
- (13) 雨谷・長岡・小島: 「インテリジェントビルでの雷撃に伴う過渡誘導電圧の検討」, 電学論 B, **115**, 7, p. 832 (1995-7)
- (14) "Protection against lightning electromagnetic impulses-Part 1: General principles", ICE-1312-1 (1995)
- (15) 茂住, 他: 「配電線における接地線のサージインピーダンス実驗式」, 電学論 B, **122**, 2, p. 223 (2002-2)
- (16) 小住, 他: 「ビル雷撃時における接地系過渡特性」, 平 13 電学全大, No. 7-104 (2001)
- (17) W. Scott-Meyer: EMTP Rule Book, B. P. A. (1982-4)
- (18) 雨谷・笠井: 「等価均質線路モデルの配電系過渡現象解析への応用」, 電学論 B, **114**, 10, p. 1059 (1994-10)
- (19) 雨谷, 他: 「変圧器 2 次側事故遮断時過渡電圧の実測と EMTP シミュレーション」, 電学論 B, **118**, 4, p. 381 (1998-4)
- (20) E. D. Sunde: Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover (1949)
- (21) 雨谷: CABLE PARAMETERS Rule Book, 日本 EMTP 委員会 (1996-4)
- (22) 雨谷: 「ケーブル過渡現象解析における問題点と対策」, EMTP J., Vol. 5, p. 3 (2000-4)
- (23) 園田, 他: 「変電所埋設地線のインパルス電流における接地抵抗特性について」, 電学論 B, **121**, 5, p. 671 (2001-5)
- (24) A. Ametani, S. Yamaguchi, and N. Nagaoka: "Mutual impedance between overhead and underground cables", *EMTP J.*, **4**, p. 84 (1999-4)
- (25) 山口, 他: 「埋設地線近傍での制御線に生ずる誘導電流 第 1 報」, 平 10 電学全大, No. 1692 (1998-3)
- (26) 山口, 他: 「埋設地線へ接地した同軸ケーブルの過渡解析」, 平 10 電学関支連大, G 5-8 (1998)
- (27) A. Ametani, et al.: "Wave propagation characteristics of iron conductors in an intelligent building", *Trans. IEE Japan*, **120-B**, 1, p. 31 (2000-1)
- (28) 今井・土橋・浅川・横山: 「低圧配電線に生じる誘導雷過電圧の実験的検討」, 電学論 B, **110**, 8, p. 687 (1990-8)
- (29) A. Ametani, et al.: "An investigation of overvoltages on home appliances in a power distribution system", 3rd ISCE Proc., p. 90 (1994-11)
- (30) 清水, 他: 「家電機器インピーダンス周波数特性と等価回路」, 平 6 電学全大, No. 1405 (1994)
- (31) 雨谷: 「過渡現象解析プログラム EMTP の最近の動向」, 電学誌, **113**, 2, p. 936 (1993-2)
- (32) 野田・Dube: シミュレーションモデル記述言語 MODELS 例題集, 日本 EMTP 委員会 (1996-4)
- (33) 雨谷・長岡・馬場・菅: 電気・電子回路解析プログラム EMTP 入門, 電気学会 (2001-1)

雨谷 昭弘 (正員) 1944 年 2 月 14 日生まれ。1973 年マンチェスタ大学院博士課程修了。Ph. D. 1976 年から 1981 年米国 BPA にて EMTP の開発に従事。1985 年同志社大学教授, 現在に至る。1988 年 Leuven 大学教授兼任。分布定数回路, 過渡現象, 高調波, 数値解析法の開発に従事。1976 年電気学会論文賞。1996 年照明学会論文賞。英国技術士。CIGRE 特別会員。IEE および IEEE フェロー。