

産業用電力システムのトラブルと解析

トラブルの実例と解析(2)

加戸良英*1 浦野恭博*2 壹岐浩幸*3 堀 史治*4 亀田和之*5

前号に続き電力系統解析例を紹介する。本号で紹介する事例は、トラブルへの適用例として近隣の大型発電機負荷遮断試験時の発電機動揺現象解析例、設計への適用例として鉄塔引き込み受電開閉所設計時の雷サージ解析例である。

1. 近隣大型発電機負荷遮断試験時の動揺現象

ガスタービン発電機(定格出力25MW)を発電出力一定制御モードにより運転していたところ、電力会社の別幹線に接続された近隣の大型蒸気タービン発電機(定格出力149MW)の全負荷遮断試験により出力が動揺し、電力逆送警報が発報した(警報は有効電力逆送継電器の事前警報のため設置されていた)。当該大型発電機は10日前にも全負荷遮断テストを実施しており、その際は電力動揺が発生していないこともわかった。電力動揺の様相を考察するべく解析を行った。

(1) 電力動揺の状況と系統解析結果

【電力動揺の状況】

図1は、8か月後に実施された当該大型発電機の再負荷遮断テスト時に、測定されたガスタービン発電機の動揺波形で

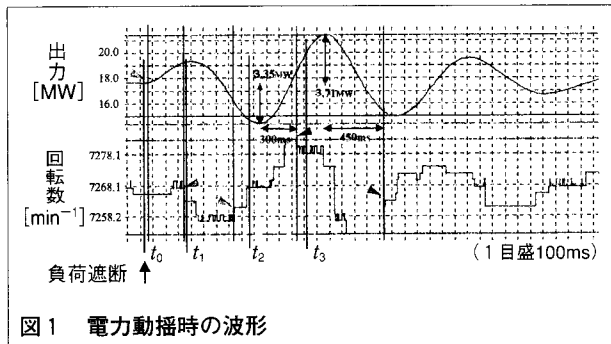


図1 電力動揺時の波形

ある。記録から最大両振幅で出力は7MW、回転数は30min⁻¹(rpm)、時間は数秒間にわたり変動し、その後収束しつつあることがわかる。なお、回転数はタービン側の回転数であり、定格回転数は7,280min⁻¹である。

【系統および設備概要】

系統図を図2に示す。両発電機は電力会社A変電所の別幹線の受電設備に接続されており、電力会社A変電所はこの工業地帯の基幹変電所で上位系変電所や発電所と連系されている。

【系統解析結果】

汎用系統解析ソフトウェア(ETAP PowerStation:実効値計算ソフトウェア)による解析結果を図3に示す。解析に使用したデータは、ガスタービン発電機以外は、電力会社、他

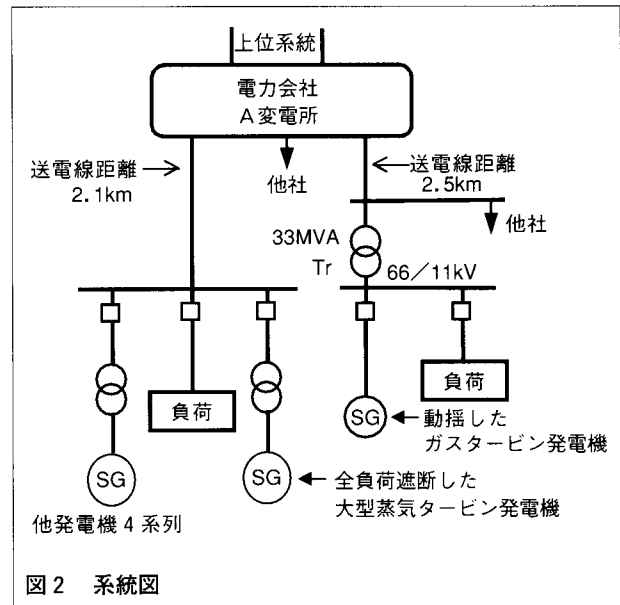


図2 系統図

*1 旭化成(株)水島支社 設備管理部 電気設備管理課長 (カド ヨシヒデア)
 *2 出光エンジニアリング(株)技術部 主任部員 (ウラノ ヤスヒロ)
 *3 (株)FFCシステムズ テクニカルセンター シニアコンサルタント (イキ ヒロユキ)
 *4 日揮(株)エンジニアリング本部 チーフエンジニア(電気) (ホリ フミハル)
 *5 (有)エルテクス設計 代表取締役 (カメダ カズユキ)

トラブルの実例と解析(2)

社設備のため推定値を用いた。

図3 (a) は電力会社のA変電所の運転容量を下げた場合の解析波形、図3 (b) は電力会社の運転容量を上げた場合の解析波形である。他にも近隣他社の大型発電機運転台数、電力会社上位の電源容量を変えて解析した。これらの解析結果は割愛するが、電力会社の運用状態が大きくガスタービン発電機の動揺に関与することが判った。系統の動揺は負荷遮断や事故により多かれ少なかれ発生するが、その動揺量は系統容量に大きく左右される。

(2) 電力動揺波形の考察

図1の電力動揺波形は、出力の動揺が内部相差点に起因することおよび内部相差点の動揺が回転数の変化として現れることを示す貴重な波形であるため考察を加える。

【考察方法】

出力の動揺と内部相差点、内部相差点と回転数変化の関係は以下のように考えられる。

① 発電機出力と内部相差点の関係

発電機出力 P_e と内部相差点 δ の関係は、2月号で述べたように、以下の特性方程式法で示すことができる。ただし、2月号では過渡性を考慮した式であったが、本事例は定態安定度領域の動揺と考えるため、端子電圧降下は無視できるものとし P_{max} は一定と考える。

$$P_e = \frac{E_g \cdot V}{X_d \cdot X_l} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \text{ [pu]}$$

E_g : 内部誘起電圧 [pu], V : 端子電圧 [pu]

X_d : 同期インピーダンス [pu], X_l : 系統リアクタンス [pu]

② 内部相差点の変化と回転数

実際の内部誘起電圧は、3月号で述べたParkの2軸方程式の q 軸上に誘起されるが、ここでは簡単のために回転子軸に固定された磁極Nを置き、その線上に内部誘起電圧 E_g が誘起されたモデルを想定し考察する。内部相差点 δ はこの内部誘起電圧と端子電圧 V の相差点であり、内部相差点の動きは定

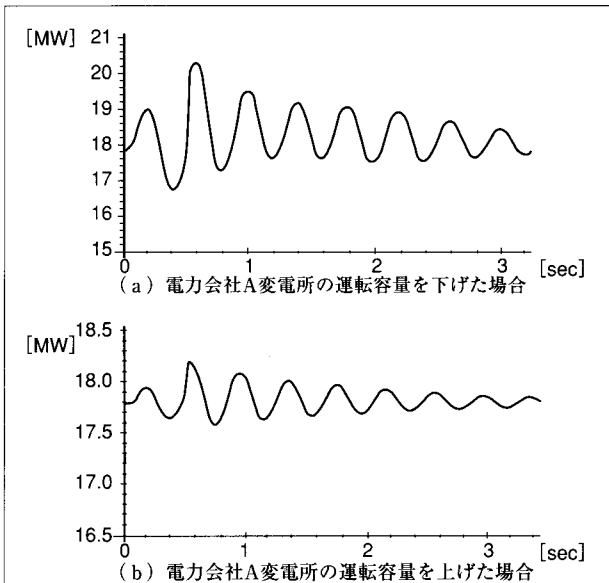


図3 ETAP PowerStationによる解析波形

格回転数で回転する座標系で考える。

【考察結果】

図1に示した時刻 $t_0 \sim t_3$ におけるガスタービン発電機の出力と内部相差点、回転子軸の位置を図4に示し動揺現象を考察した。図中の P_m は機械入力であり、ガバナは動いていないため一定とする。なお、図4の動きは相差点の動きを大きく描いているため、実際の相差点とは異なる。

① 負荷遮断前の状態：負荷遮断前の状態を内部相差点 δ_0 とする。端子電圧は系統電圧とも相差点を有して連系されている

② 時刻 t_1 における状態：他社大型発電機の負荷遮断により大型発電機が接続されていた母線の相差点が開き、その影響を受けて端子電圧は図4 (b)のように相差点を開く。図中において、端子電圧の元の位置を基準軸として示す。内部相差点は、 δ_0 から δ_1 へ開き出力は増加するが、ガスタービン発電機の回転子軸は動いていないため回転数は変化しない。図1の波形で、回転数が変化せず出力が増加したのはこのためである。

この出力増加は、ガバナが動いていないため発電機回転子の運動エネルギーを電気エネルギーに変えてエネルギー放出として行われる。その動きは、慣性定数を M とすると次の運動方程式で表される

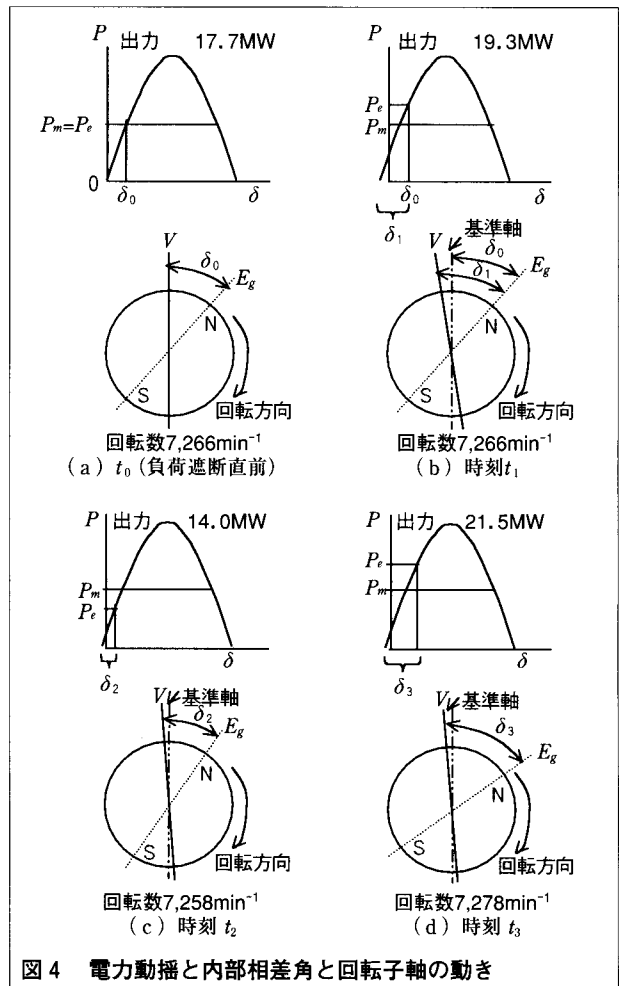


図4 電力動揺と内部相差点と回転子軸の動き

■ 産業用電力システムのトラブルと解析

$$M = \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ [pu]}$$

- ③ 時刻 t_2 における状態：いつまでも入力に対して出力を大きくできないため、回転子の加速度は負となり、軸は内部相角度を減少する方向に動く。この結果、内部相角度を δ_1 から δ_2 へ閉じ、発電機出力は機械入力以下に低下するため回転エネルギーとして蓄積される。

ここで内部相角度の動き、すなわち発電機軸の動きに注目すると、次のように瞬時的な速度変化として現れる。

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} \text{ [rad/s]}$$

$$N = N_0 + \Delta N = N_0 + 60 \times \frac{\omega}{2\pi} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

ΔN ：内部相角度の変動により現れる回転数 [min⁻¹]

N_0 ：定格回転数 [min⁻¹]

これが $t_1 \sim t_2$ に掛けて出力と回転数が低下した理由である。

さて、図1の t_2 の少し前に注目すると、回転数は定格回転数に戻っているにもかかわらず、出力は低下している。これは、電力会社の発電機が出力を増して系統の相角度を戻すように働き、端子電圧の位置が基準軸側に動いて内部相角度をさらに閉じたものと推定される

- ④ 時刻 t_3 における状態：蓄積されたエネルギーにより回転子の加速度は正となり、今度は内部相角度が増加し発電機出力は増加する。内部相角度は加速エネルギーが無くなるまで増加するはずであり、この点が内部相角度、出力とも最大となり、回転数が減速に変化する点となる。 t_3 の状態はこの状況をよく表している

以後、同様に出力、回転数の変化は繰り返され、ガバナ制御やAVR制御の異常動作がなければ、入力と出力のエネルギーバランスによりやがて収束し安定する。

(3) 大型電動機始動時の発電機界磁喪失トリップ原因

産業用電力システムにおいても電力動揺が発生し、電力動揺に伴い、電力会社との並列運転中でも図1のように回転数の変化となって現れることを述べた。1月号で紹介した事例3の、大型電動機始動時の発電機界磁喪失トリップ原因は、こうした回転数の変化とガバナに起因したものである。

この事例では、大型電動機始動による負荷電力の増加を受電電力と発電電力で分担させようとして、オペレータはガバ

ナ制御を速度調定率に従う速度（ガバナフリー）制御に切り替えた。当該ガバナの速度制御はPID制御で構成されており、微分要素のゲインが大きく設定されていた。また、AVR制御は力率一定制御であった。

大型電動機始動による負荷側電力増加は、近隣大型発電機負荷遮断時の電力動揺事例同様、発電機に変動を与え回転数が変動している。この回転数の変動は、再現試験時に瞬時的な変動として確認されており、以下にトリップに至った状況を説明する。

- ① 大型電動機始動により、内部相角度が開き出力が増大する。この出力増加は回転エネルギーの放出により行われるため、近隣大型発電機負荷遮断時の電力動揺事例図1の $t_1 \sim t_2$ のように、回転子が内部相角度を閉じる方向に動き、出力、回転数が低下した
- ② 回転数の低下によりガバナは開くが、微分要素により過剰に開き機械入力が増大し、今度は回転子が内部相角度を開く方向に動き、出力、回転数が増加した
- ③ 回転数の上昇によりガバナは閉じるが、微分要素により過剰に動くため機械入力が大きく低下する。本来ならば、こうした動きが繰り返されて出力は上下動するはずであるが、トラブル時にオペレータが大型電動機始動後、徐々に受電電力が増加し続け、最終的には発電出力相当分まで増加したことを確認していることから、発電機出力は上下動せず低下し続けたと考えられる。これからは推定であるが、ガバナを閉じた際に、大型電動機始動時の無効電力の増加やわずかな電圧降下もあり、負の制動力が発生したものと考える⁽¹⁾。負の制動力は動きを増長させるように働くため、内部相角度をさらに低下させ、ガバナが閉じる以上に出力を絞り続ける。このため、つねに機械入力は出力より大きくなり、回転数は定格回転数以上に保たれてガバナは閉じ続け、負の制動力とともに出力は低下し続けたものと推定した
- ④ AVR制御に注目すると、AVR制御は力率一定制御であったため、発電機の出力低下により図5に示すように励磁を絞るように動き、界磁喪失継電器が動作した。図中 a はトラブル前の運転点である。出力の低下により運転点は b 点に移行する。b 点は力率一定制御範囲を逸脱しているため、AVR制御は c 点へ移行するよう励磁を絞る。さらなる出力低下により d 点へ移行し励磁を再び絞り、やがて界磁喪失領域へ移行したものである

実際には、大型電動機始動により無効電力が増加しているため、さらに励磁は絞られたと思われるが、出力の低下がなければ界磁喪失に至るまでAVR制御が励磁を絞ることはない。

内部相角度による回転数の変化は、基準回転数の上に数秒間にわたって上下動を繰り返して収束するが、電気式回転数検出器のように分解能の高いガバナでは速度変動が検出されるため、速度制御をPIDで構成する場合、産業用クラスのタービン発電機では微分要素のゲインを大きく設定してはならない。本事例の対策でもガバナ制御をPID制御からPI制御に変更した。

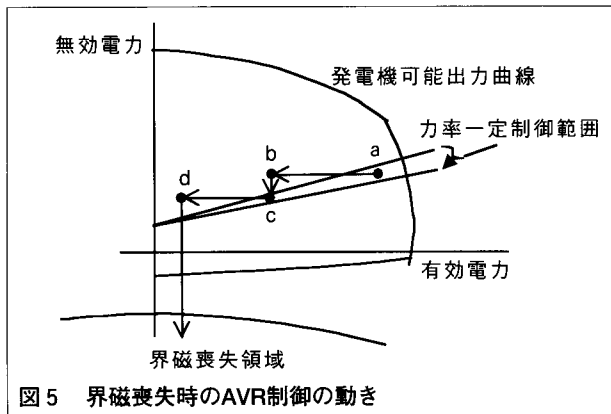


図5 界磁喪失時のAVR制御の動き

2. 鉄塔引込みにおける雷サージ解析例

(1) 雷サージ解析事例の背景と用いた手法

次に紹介するのはトラブル解析の事例ではなく、設計時における雷サージ解析の事例である。本事例では、新設中央変電所を新設プラント群の中に設置したため、新設中央変電所は受電開閉所から約2.5km離れた場所となった。受電開閉所は電力会社より66kV架空線引き込みで、この間はケーブル布設であり雷サージ反射波が重畳して異常電圧の発生が懸念されたことから、以下を目的としてサージ解析を実施した。

- ① 各点の絶縁レベルが各機器のレベル以下であること
- ② 終端に設置した避雷器の位置が適正であること。すなわち終端機器との絶縁協調が取られていること
- ③ 避雷器が保護性能を有していること。すなわち放電電流値、熱エネルギー処理能力以下であること

なお、本事例は少し古い解析事例であり、従来法の単相回路で解析されたものである。近年、雷サージ解析は着実にモデリング技術が向上しており、モデルも変わってきているため、解析法の概説と異なる点があるが、ご容赦願いたい。

【系統および設備概要】

電力会社を含めた送電系統図を図6に示す。自家用電力系統は、電力会社より受電開閉所で気中ケーブルヘッドにより引き込み、地中ケーブル、SF₆ガス絶縁開閉装置(以下C-GIS)を介した後、2回線ケーブルにて新設中央変電所C-GISと連絡し、ケーブルを介して主変圧器へ接続している。

【系統解析手法用系統および設備概要】

雷サージ解析は、汎用系統解析ソフトEMTP(Electro-Magnetic Transient Program: 瞬時値計算ソフトウェア)を用いた。

(2) 雷サージ解析の概要

雷による異常電圧の発生現象と解析法について概説する。

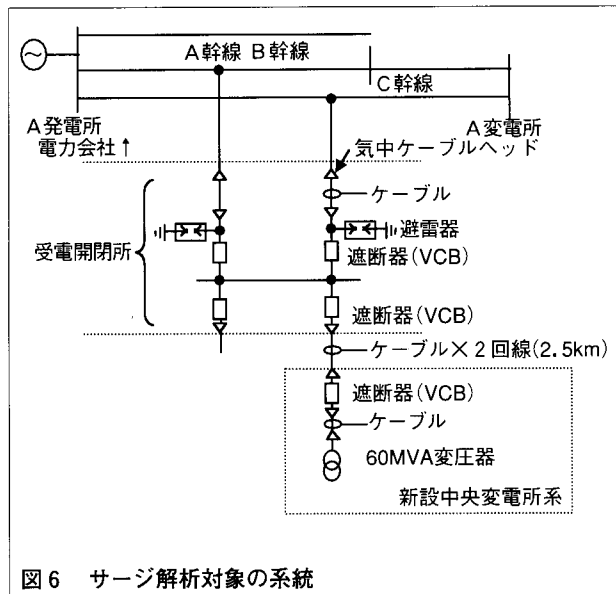


図6 サージ解析対象の系統

【雷による異常電圧の発生】

鉄塔塔頂への雷撃は、図7のように架空地線と鉄塔に分流して鉄塔の電位が上昇する。この電位上昇が、アークホーン間の耐圧を超えると逆フラッシュオーバーとなり、碍子により絶縁された電力線へ侵入して分流し受電開閉所、中央変電所へ達していく。

侵入した雷サージは、図8(a)のように減衰しながら伝搬し、同図(b)のようにサージインピーダンスの異なる線路同士や集中定数インピーダンスとのつなぎ目で反射したり、透過したりしながら重畳する。これらの詳細は多くの文献に記載されているので参照されたい。

【解析法の概説⁽²⁾】

(a) 想定する雷現象

遠方雷サージは、送電線を伝搬する距離が長いほど減衰する。一方、変電所に近い近接雷サージは急しゅんなサージが変電所内に侵入し往復反射を繰り返し過電圧を発生することがあるため、変電所に最も近い第1鉄塔の雷撃を解析対象とすることが多い。雷撃電流の想定は以下のようである。

- ① 雷撃電流の大きさ：雷撃電流値として、わが国では表1に示す想定雷撃電流が用いられる。解析では、この値を雷道インピーダンス(400Ωの抵抗)と並列にして雷撃

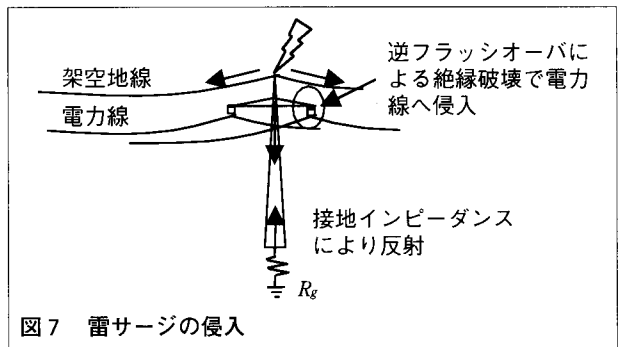


図7 雷サージの侵入

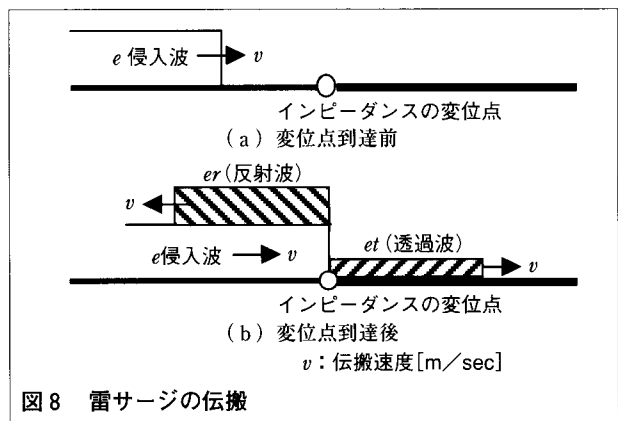
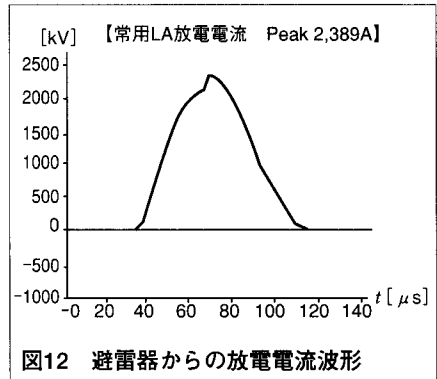
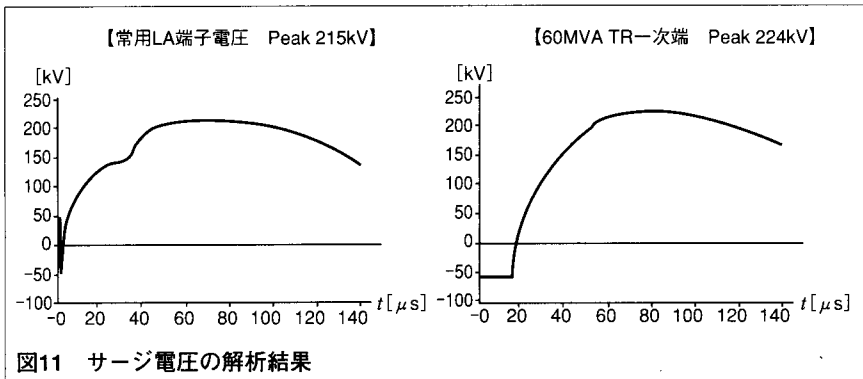
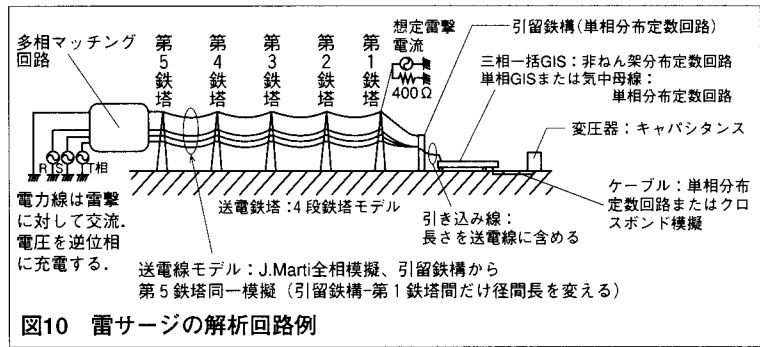
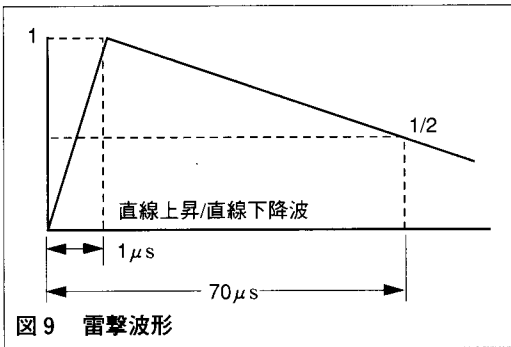


図8 雷サージの伝搬

表1 想定雷撃電流推奨値

電圧階級	66	77	110	154	187	220	275	500
雷撃電流推奨値[kA]	30	30	60	60	80	100	100	150
備考	*電撃頻度の大きい地域、事故障害の大きい地域では重要性を勘案し40kAを推奨							



とする

- ② 雷撃波形：わが国では、図9のように波頭部しゅん度に着目して波頭長 $1\mu\text{s}$ で直線的に上昇し、波尾長の長いものの確率は小さいことから波尾長 $70\mu\text{s}$ で直線的に減衰する波形が用いられる

(b) 解析方法

最近の雷サージの解析回路例を図10に示す。主な線路と鉄塔のモデル例と解析を概説する。

- ① 架空地線と電力線6相(2回線)の線路において、それらの相互誘導を考慮した多相回路モデルを用いる。線路定数はEMTPのJ.Martiモデルを用いる。第5鉄塔以遠は無限長線路を模擬する多相マッチング回路を用いる
- ② 鉄塔を上、中、下相のアーム取り付け位置で4つに分割した4段鉄塔モデルを用いる
- ③ 解析：第1鉄塔への雷撃での鉄塔各部の電圧波形、逆フラッシュオーバーによる電力線への侵入サージ波形、変電所で発生する過電圧波形などの雷サージ現象についてEMTPで計算を行い、計算結果に基づき評価する

(3) 解析結果

【想定電流】

重要性を考慮し 30kA の他、 66kV 系統推奨値 40kA 以上の 50kA についても解析した。

【解析結果】

雷撃電流 50kA における解析結果について、図11に避雷器および最も避雷器から遠く電圧の上昇する変圧器の電圧波形を、図12に避雷器(以後LA)の放電電流波形を示す。この系統のBIL(基準衝撃絶縁強度)は 350kV であり、解析結果、変圧器までLAの保護範囲にあることがわかった。また、避雷器

からの放電電流は許容放電電流値 10kA 以下であり、いずれも設計上問題のないことがわかる。

◇ ◇ ◇
今月号の解析事例では、電力動揺の解析事例と雷サージ例について紹介した。

電力動揺の事例では実際の波形を併記することで自家用電力システムでも電力動揺が発生することを明らかにした。この要因については、電力会社の系統の強さや各社を含めた運用形態が影響するが、他にも制動力等発電機側の要因により動揺の大きさが異なるのではないと思われる。いずれはこうした点も解析により明らかにできればと考えている。

雷サージ解析の事例では、解析の必要ケースについて触れなかったが、LAの保護範囲が広くサージインピーダンスの変位点が多い場合や、何らかの理由により系統電圧は変えずに引込鉄塔を高くする場合に雷撃電流が大きくなることなど解析を実施した方がよいケースも多いと思われる。実際の解析には、ユーザーも不慣れなことや雷現象そのものが複雑なこと、系統モデルなど種々研究中であることから、専門知識を有するメーカーなどの協力が必須である。

次号では、解析の設備および運転への反映例、解析データに対する留意点と電力システム解析の課題について報告する。

◆参考文献◆

- (1) 関根泰次：「電力系統過渡解析論」, オーム社, 昭和59年
- (2) 電気学会技術報告第872号：「電力システムの過渡現象とEMTP解析」, 電気学会, 平成14年