

第 **II** 編

保護システムの技術計算

執筆委員

村中 慶三

(東京芝浦電気株式会社)
産業施設技術部 部長

西脇 誠五郎

(東京芝浦電気株式会社)
産業施設技術部 主査

目 次

1 序 論

1・1 電力設備の信頼度と保護	Ⅲ-1
1・2 絶縁協調	Ⅲ-2
1・3 保護継電システム	Ⅲ-2

2 異常電圧の発生

2・1 異常電圧の種類	Ⅲ-3
2・2 雷サージ	Ⅲ-3
2・2・1 雷の性質	Ⅲ-3
2・2・2 直撃雷	Ⅲ-5
2・2・3 誘導雷	Ⅲ-8
2・3 進行波	Ⅲ-9
2・3・1 進行波の原理	Ⅲ-9
2・3・2 進行波の変歪	Ⅲ-11
2・3・3 進行波の反射および透過	Ⅲ-12
2・3・4 格子図	Ⅲ-15
2・4 持続性異常電圧	Ⅲ-18
2・4・1 持続性異常電圧の種類	Ⅲ-18
2・4・2 商用周波異常電圧	Ⅲ-18
2・4・3 接地係数	Ⅲ-20
2・4・4 鉄心飽和に起因する異常電圧	Ⅲ-21
2・5 地絡時の過渡異常電圧	Ⅲ-23
2・5・1 1線地絡時の過渡異常電圧	Ⅲ-23
2・5・2 2線地絡時の過渡異常電圧	Ⅲ-23
2・5・3 地絡点の再点弧（間欠弧光地絡）異常電圧	Ⅲ-24
2・6 開閉サージ	Ⅲ-25
2・6・1 無負荷線路の開閉サージ	Ⅲ-25
2・6・2 誘導性小電流シャ断	Ⅲ-26

3 電気機器の絶縁強度

3・1 絶縁階級と試験電圧	Ⅲ-29
3・2 機器の絶縁強度	Ⅲ-30
3・2・1 内部絶縁と外部絶縁	Ⅲ-30



3.2.2 V-f 特性	Ⅲ-31
3.2.3 絶縁の劣化・寿命	Ⅲ-32
3.2.4 変圧器の絶縁強度	Ⅳ-33
3.2.5 回転機の絶縁強度	Ⅲ-35
3.3 汚損と絶縁強度	Ⅳ-37
3.3.1 汚損事故の発生	Ⅲ-37
3.3.2 汚 損 区 分	Ⅲ-38
3.3.3 汚損耐電圧目標値	Ⅲ-38
3.3.4 汚損と耐電圧特性	Ⅲ-38
3.3.5 汚損防止対策	Ⅲ-40

4 避 雷 器

4.1 避雷器の働き	Ⅲ-43
4.2 避雷器の構成	Ⅳ-44
4.3 避雷器の特性と定格	Ⅲ-46
4.3.1 保 護 特 性	Ⅳ-47
4.3.2 放電開始電圧	Ⅳ-47
4.3.3 制限電圧特性	Ⅳ-49
4.3.4 放 電 耐 量	Ⅳ-49
4.3.5 統流しゃ断能力	Ⅳ-49
4.3.6 耐汚損特性	Ⅳ-51
4.4 ギャップレス避雷器	Ⅲ-52

5 受変電設備の絶縁協調

5.1 受変電設備の雷しゃへい	Ⅲ-54
5.1.1 雷しゃへい方法	Ⅲ-54
5.1.2 雷しゃへい効果	Ⅲ-54
5.2 接 地 設 計	Ⅲ-57
5.2.1 接地の目的	Ⅲ-57
5.2.2 鉄塔脚の接地	Ⅲ-57
5.2.3 受変電設備の接地設計	Ⅲ-58
5.2.4 接地抵抗の計算	Ⅲ-62
5.2.5 変電所の接地設計例	Ⅲ-65
5.3 避雷器の適用	Ⅲ-67
5.3.1 避雷器の選定	Ⅲ-67
5.3.2 絶縁協調の検討	Ⅳ-72
5.3.3 線路引込口周辺機器の絶縁協調	Ⅲ-76
5.3.4 中性点避雷器の適用	Ⅳ-79

5.3.5 架空線ケーブル接続系統の絶縁協調	Ⅲ-79
5.3.6 SF ₆ ガス絶縁密閉形開閉装置における避雷器の適用	Ⅲ-83
5.4 変圧器の移行電圧	Ⅲ-86
5.4.1 移行電圧の種類	Ⅲ-86
5.4.2 静電移行電圧	Ⅲ-86
5.4.3 電磁移行電圧	Ⅲ-90

6 保護継電システム

6.1 保護継電システムの機能	Ⅲ-93
6.2 保護継電システムの構成	Ⅲ-93
6.2.1 主保護と後備保護	Ⅲ-94
6.2.2 区間保護方式	Ⅲ-95
6.2.3 限時差保護方式	Ⅲ-96
6.2.4 方向選択保護方式	Ⅲ-97
6.3 保護継電器の基本事項	Ⅲ-97
6.3.1 保護継電器の規格	Ⅲ-97
6.3.2 保護継電器の定格	Ⅲ-98
6.3.3 保護継電器の応動	Ⅲ-99
6.4 保護継電器の動作原理と構造	Ⅲ-101
6.4.1 可動鉄心形継電器	Ⅲ-102
6.4.2 誘導形継電器	Ⅲ-104
6.4.3 静止形継電器	Ⅲ-106
6.5 保護継電器の種類と特性	Ⅲ-108
6.5.1 誘導形単一相継電器	Ⅲ-108
6.5.2 誘導形方向継電器	Ⅲ-109
6.5.3 差動継電器	Ⅲ-110
6.5.4 距離継電器	Ⅲ-111

7 計器用変成器

7.1 変流器	Ⅲ-115
7.1.1 変流器の種類	Ⅲ-115
7.1.2 変流器の特性	Ⅲ-116
7.1.3 変流器の接続	Ⅲ-123
7.2 零相変流器	Ⅲ-126
7.2.1 零相変流器の種類	Ⅲ-126
7.2.2 零相変流器の特性	Ⅲ-127
7.2.3 零相変流器の接続	Ⅲ-128
7.3 計器用変圧器	Ⅲ-129



7.3.1	計器用変圧器の種類	Ⅲ-129
7.3.2	計器用変圧器の特性	Ⅲ-129
7.3.3	計器用変圧器の接続	Ⅲ-132
7.4	コンデンサ形計器用変圧器	Ⅲ-133
7.4.1	コンデンサ形計器用変圧器の種類	Ⅲ-133
7.4.2	コンデンサ形計器用変圧器の特性	Ⅲ-134
7.4.3	コンデンサ形計器用変圧器の過渡現象	Ⅲ-135

8 故障計算

8.1	インピーダンス計算	Ⅲ-137
8.2	インピーダンス計算の実際	Ⅲ-138
8.2.1	インピーダンスの仮定	Ⅲ-138
8.2.2	計算の簡略化	Ⅲ-141
8.2.3	インピーダンスマップ	Ⅲ-143
8.3	対称座標法	Ⅲ-144
8.3.1	対称分インピーダンスと等価回路	Ⅲ-148
8.3.2	3相変圧器の対称分インピーダンス	Ⅲ-149
8.3.3	代表的な故障回路の計算	Ⅲ-151

9 受電回路の保護

9.1	受電設備の構成	Ⅲ-163
9.2	放射状受電回路の保護	Ⅲ-164
9.2.1	変流器の選定	Ⅲ-165
9.2.2	継電器の選定	Ⅲ-165
9.2.3	電力会社送電端との保護協調	Ⅲ-165
9.3	ループ受電回路の保護	Ⅲ-167
9.3.1	表示線継電方式	Ⅲ-167
9.3.2	電流循環表示線継電方式	Ⅲ-167
9.3.3	電圧反向表示線継電方式	Ⅲ-168
9.3.4	標本値と行先	Ⅲ-169
9.3.5	変流器の選定	Ⅲ-170
9.3.6	継電器の選定	Ⅲ-170
9.3.7	継電器の整定	Ⅲ-171
9.3.8	表示線回路	Ⅲ-173
9.3.9	表示線回路の監視および保護	Ⅲ-174
9.3.10	ループは線の保護	Ⅲ-175
9.4	並行2回線受電回路の保護	Ⅲ-176
9.5	スポットネットワーク受電回路の保護	Ⅲ-178

9-5-1 ネットワークプロテクタ	Ⅳ-178
9-5-2 スポットネットワーク受電回路の保護協調	Ⅲ-180
9-5-3 ネットワークプロテクタの誤動作と防止対策	Ⅲ-182

10 変圧器の保護

10-1 変圧器の保護装置設置基準	Ⅳ-185
10-2 比率差動継電方式	Ⅳ-186
10-2-1 励磁突入電流とその対策	Ⅳ-186
10-2-2 変流器の選定	Ⅲ-188
10-2-3 継電器の選定	Ⅲ-189
10-2-4 継電器の接続	Ⅳ-189
10-3 3巻線変圧器の比率差動保護方式	Ⅳ-191
10-4 比率差動継電器の整定	Ⅳ-192
10-5 変圧器の過電流保護	Ⅳ-195
10-6 変圧器の地絡保護	Ⅳ-195

11 母線の保護

11-1 母線保護方式	Ⅳ-197
11-1-1 電流差動方式	Ⅲ-197
11-1-2 電圧差動方式	Ⅳ-199
11-1-3 位相比較方式	Ⅳ-200
11-1-4 方向比較方式	Ⅳ-201
11-1-5 変流器の選定	Ⅳ-201
11-2 母線選択保護方式	Ⅳ-202

12 配電線の保護

12-1 配電方式	Ⅲ-205
12-1-1 放射状方式	Ⅳ-205
12-1-2 常用予備切換方式	Ⅲ-205
12-1-3 並行2回線方式	Ⅳ-205
12-1-4 ループ方式	Ⅲ-206
12-1-5 スポットネットワーク方式	Ⅳ-206
12-2 片端電源配電線の短絡保護	Ⅲ-206
12-2-1 変流器の選定と接続	Ⅳ-207
12-2-2 過電流継電器の選定	Ⅲ-207
12-2-3 過電流継電器の整定	Ⅳ-208
12-3 両端電源配電線の短絡保護	Ⅲ-214
12-4 配電系統の接地	Ⅳ-215



12・5 地絡事故時の電圧と電流.....	Ⅲ-218
12・5・1 系統の静電容量の影響.....	Ⅲ-220
12・6 配電線の地絡保護方式.....	Ⅲ-221
12・6・1 系統接地方式の選定.....	Ⅲ-221
12・6・2 零相電圧の検出.....	Ⅲ-221
12・6・3 零相変流器の選定.....	Ⅲ-223
12・6・4 継電器の選定.....	Ⅲ-223
12・6・5 地絡保護協調.....	Ⅲ-225

1. 序 論

電力設備の保護とは、電力設備の異常状態、すなわち事故の発生および拡大を防止することである。

電力設備の事故には、短絡、地絡、断線、過熱、機械的破壊などがあり、その発生原因として、雷などの異常電圧、地震などの自然災害、異物の接触、絶縁劣化、環境による汚損、過負荷、製作施工の不完全、保守不良などをあげることができる。これらの事故のうちもっとも多いのが短絡、地絡などの絶縁事故で、その他の事故もほとんど絶縁事故に発展する。したがって、事故を防止するには、電気設備の絶縁を強化することが重要であるが、あらゆる電気的ストレスに耐える絶縁をほどこすには経済的な制約があり、避雷器などの保護装置を適用することにより絶縁を合理的に行い、いわゆる絶縁協調が行われる。

一方、発生した事故を速かに検出除去することにより、設備の破壊と事故の波及を最少限にするとともに、正常状態への復旧を容易にするため、各種種の保護継電システム（狭義の保護）が適用される。

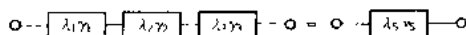
本章では、保護の重要さを電気設備の信頼度の面から考察するとともに、絶縁協調および保護継電システムの概念について述べる。

1.1 電力設備の信頼度と保護

電力設備の事故は、電力供給の停止あるいは負荷設備の運転停止を意味し、生産の停止、サービスの低下をまねくばかりでなく、それが拡大する場合あるいは長時間にわたる場合には、設備の破壊、公害の発生、社会機能の停止にまで発展し、大きな社会問題となる恐れがある。

電力設備の信頼度は、第1編2.1の解説のように、通常、停止率（年間停止回数： λ ）と停止時間（年間合計停止時間： $\lambda \cdot \tau$ ）で表され、電気設備を構成する電源、線路、機器などの停止率と停止時間の合成として、第1.1図に示すような、直並列計算により求めることができる。

一般に、信頼度を改善するには、構成要素個々の信頼度を改善するほか、停止率の改善には回路構成をできるだけ単純にし構成要素を減らすことが役立ち、停

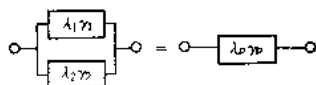


$$\lambda_S = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$

$$\lambda_S \tau_S = \lambda_1 \tau_1 + \lambda_2 \tau_2 + \lambda_3 \tau_3$$

$$\tau_S = \frac{\lambda_1 \tau_1 + \lambda_2 \tau_2 + \lambda_3 \tau_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

(a) 直列回路の合成



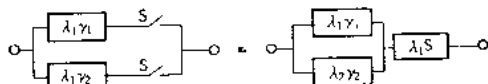
$$\lambda_P = \lambda_1 \lambda_2 (\tau_1 + \tau_2)$$

$$\text{または } \lambda_P = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\tau_1 + \tau_2)}{1 + \lambda_1 \tau_1 + \lambda_2 \tau_2}$$

$$\tau_P = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$$

$$\lambda_P \tau_P = (\lambda_1 \tau_1)(\lambda_2 \tau_2)$$

(b) 並列回路の合成



$$\lambda_P = \lambda_1 \lambda_2 (\tau_1 + \tau_2) + \lambda_1$$

$$\lambda_P \tau_P = (\lambda_1 \tau_1)(\lambda_2 \tau_2) + (\lambda_1 \tau_1)$$

ただし $S < \tau_1 = \tau_2$ とする。

(c) 混並列回路の合成

第1.1図 供給信頼度の直並列計算

止時間の改善には回路構成に並列冗長性をもたすことが有効である。

保護と信頼度の関係において、絶縁協調などの事故発生防止策は停止率の改善に役立つ。保護継電システムは事故波及の防止による全体の停止率の改善および事故範囲の明確化による事故復旧時間、すなわち停止時間の短縮に有効である。

1-2 絶縁協調

絶縁協調とは、発電所、送配電線、負荷設備などの電気設備全体の絶縁を避雷器、接地装置などの保護装置の適用を含めて、技術的、経済的に合理的に行うことである。

電気設備の絶縁は、当然のことながら実際の運転電圧に長期間耐えるほか、それが接がる系統に発生する雷サージ、開閉サージなどの異常電圧に耐える必要がある。通常、これらの異常電圧は運転電圧の数倍から数十倍にも達し、単に電気設備の絶縁の強化のみでこれに耐えることは困難な場合が多い。そこで、系統接地、シャヘイなどの採用によりサージの発生を抑制するとともに、避雷器、保護ギャップなどによりサージ電圧値の制限を行い、電気設備の絶縁との協調がはかられる。

電力会社の発電所あるいは送配電線に対する絶縁協調については、すでに各種の基準が明らかにされている。一般需要家の受変電設備、配電線、負荷荷設備における絶縁協調の基本は、それらの応用と考えられるが、その設備形態、使用目的の違いから、若干の相異があるかも知れない。これらの検討にあたっては、まず、系統に発生する各種の異常電圧を知るとともに、電気設備の絶縁強度、各種保護装置の特性を知る必要があり、つぎに、これら相互の協調関係の検討を進めることになる。

1-3 保護継電システム

保護継電システムとは、電力系統、電気機器の異常状態を速かに検出し除去することにより、人身の安全、設備の損傷防止、2次災害の防止をはかるとともに、ほかの電力系統への異常の波及を防ぎ、電力供給の安定と信頼度の向上をはかるために設置される保護継電器を中心としたシステムである。

近年のオートメーション化された工場やビル施設における電気設備の事故損害は、単に停電や設備の停止による生産減やサービスの低下にとどまらず、場合によっては多くの製品の不良、中間原材料のスクラップ化、設備の破壊を伴い、最悪の場合には火災の発生や人身事故に発展する恐れもある。また、間接的な損害としては、事故復旧後も工場が元どおり正常に稼働するまでには多くの日時を必要とすることがあげられる。

受電点から負荷末端にいたるまでの保護継電システムは、それぞれが万一の事故発生時にその拡大防止の重大責務を担っており、その不具合は予想外の大損害を生ずる恐れがある。したがって、その選定にあたっては、保護対象の大きさよりも、その事故による損害の大小を中心に考えることが大切である。一般に、保護継電システムは、電気設備の保険であるといわれている。すなわち、平常状態においてはなんら必要がなく、万一の事故発生時にその損害を極限し、平常状態への回復に役立つあたりは、人間社会における保険と同一機能をもっているといえる。

2. 異常電圧の発生

2.1 異常電圧の種類

送配電系統に発生する異常電圧は、その原因が雷のような系統の外的要因による外雷と系統の開閉操作に伴う開閉サージのような内的要因による内雷との二つに大別される。外雷には、

- (i) 誘導雷
- (ii) 直撃雷

があり、通常これらの異常電圧波高値は系統機器の絶縁強度以上となるので、適切な保護装置が必要となる。また、内雷は、その種類がきわめて多く、現象的にみるとつぎのように分類される。

- (i) 持続性異常電圧
- (ii) 過渡異常電圧 故障時の過渡異常電圧、開閉時の異常電圧

持続性異常電圧は、地絡時の共振異常電圧などのように比較的長時間継続するので、系統の絶縁はこれらの異常電圧に耐えるよう設計される。一方、過渡異常電圧の代表である開閉時の異常電圧は無負荷送電線の充電電流シャ断時の再点弧サージのように、電圧波高値も比較的高くエネルギーの大きいものもあるが、避雷器による保護の対象となる。

第2.1図は、各種内雷の発生原因、機構、状態などの相互関係を示したものである。

2.2 雷サージ

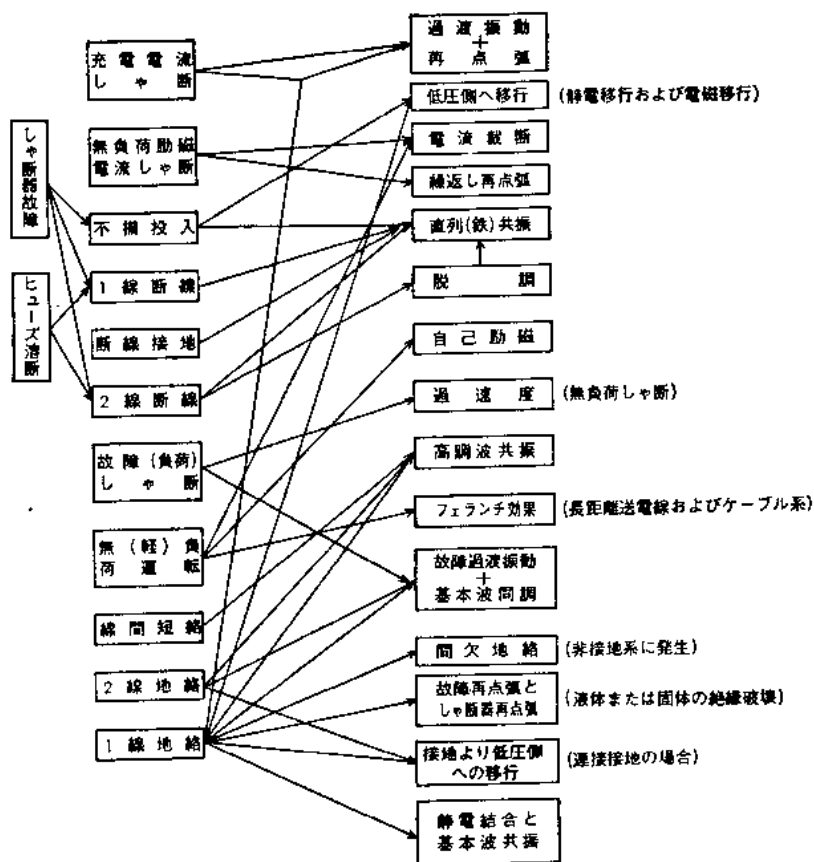
2.2.1 雷の性質

雷雲の発生機構に関しては、20世紀初頭からさまざまな学説が発表されているが、まだ結論は得られていない。しかし、現象的には雷雲は激しい上昇気流の結果発生する、上昇気流のきっかけとなる原因により、

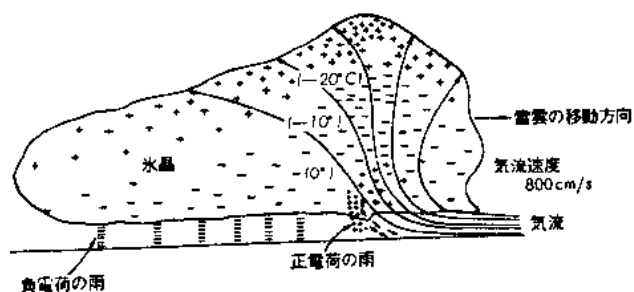
- (i) 熱雷 夏期の入道雲に代表されるもので地表面の過熱が原因となり発生するもの。
- (ii) 界雷 低気圧と高気圧のぶつかる場所で発生するもの。
- (iii) 地形雷 山はだなどをなめて雲が上昇する場合に発生するもの。
- (iv) 自然雷 火山の爆発などにより発生するもの。

などに分けられる。

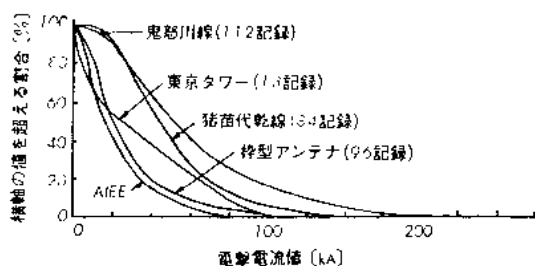
第2.2図は、Simpson氏の雷雲モデルで、激しい上昇気流の結果雷雲に電荷がどのように分布するかを示したものである。雷雲の下部地表側は(－)電荷の部分が多い。したがって、直撃雷の90%は(－)極性である。反対に誘導雷は、(＋)極性のものが多く、実測によれば、(＋)極性のものは45～80%、(－)極性のものは10～40%である。雷雲の地表側と地表間の電位差は、落雷直前に測定された地表付近の電位傾度が普通30～40kV/m、最大100kV/mであり放電距離が約1kmであることから、数万kV～数十万kVと想定される。雷放電電流は、20～40kAが普通であるが、まれに100～200kAに達するものもある。



第2-1図 内部異常電圧相関図



第2-2図 Simpson氏の雷震モデル



第2-3図 雷撃電流発生頻度分布

第2-3図は、わが国における雷撃電流発生頻度分布である。1回の放電により中和される電荷の量としては普通は10～25クーロンであるが、多い場合は160クーロンに達することがある。雷電流波形は、種々のものが観測されているが、波頭長1～2 μ s 半波高時間が30～50 μ s 程度のものが多い。そのエネルギーの電力量は、継続時間が短いので4～100kW/h程度にすぎないが、瞬間電力は電流値が大きいため数億～数十億kWに達する。

放電が1回で終わる雷撃は少ない。第2-4図はわが国における一つの市撃中に含まれる雷撃数(多重度)と発生頻度を示したもので、最大14回、平均2.8回となっている。また、外国の観測では42回の例がある。

第2-1表は、雷放電に関する種々のパラメータをまとめて示したものである。

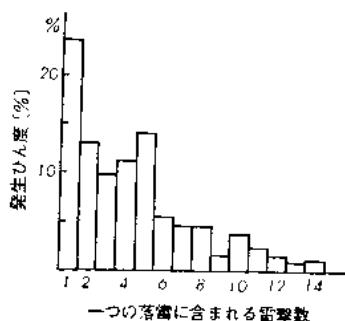
2-2-2 直撃雷

直撃雷により線路導体に雷サージが侵入する経路

として、導体直撃、逆フラッシュオーバ、経間逆フラッシュオーバなどがある。いずれにしても線路導体には、きわめて高い異常電圧が発生する。

(1) 導体直撃

架空地線のない線路は、常に直撃雷の危険にさらされている。また、架空地線を架設した線路でもしゃへい効果が不十分な場合もあり、線路導体に直撃雷を受けることがある。

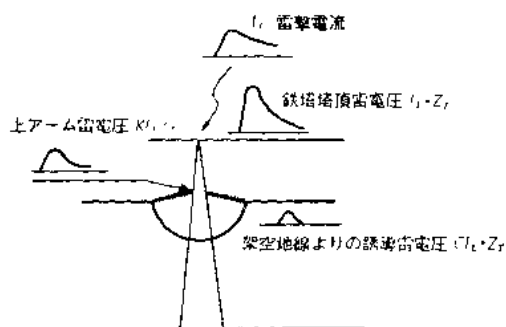


第2-4図 雷撃多重度の統計

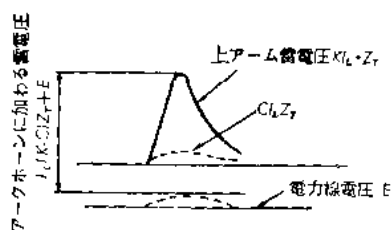
第2-1表 雷放電パラメータ

要 素	代 表 値	範 囲
電 流 波 高 値 (IP)	10～20 kA	～ 110
電 流 し ゃ ん 度 (di/dt)	10 kA/ μ s	1～80
波 頭 長 (Tf)	2 μ s	1～30
波 尾 長 (Tt)	40 μ s	10～250
放電電荷(連続放電を除く)	2.5 C	0.2～20
多 重 度	3～4	1～26
放 電 路	5 km	2～14

線路導体に直撃雷を受けると、その近傍がいしは雷電圧に耐えることができずフラッシュオーバを起こす。この場合の電圧波形は数 μ s以下でフラッシュオーバ電圧(波高値)に達し、つぎにがいしのフラッシュオーバでさい断されたいわゆるさい断波形となり、フラッシュオーバ後の波尾



(a) 鉄塔雷撃時の各部の波形



(b) アークホーンに加わる電圧
第2-5図 鉄塔逆フラッシュオーバー
発生機構

電圧は鉄塔の接地抵抗と雷撃電流の積で決まる値となる。フラッシュオーバー後の波尾電圧が高いと隣接あるいは数基離れた鉄塔でも引続いてフラッシュオーバーを起こすことがある。いずれにせよ、線路導体に直撃雷を受けた場合は最終的にはがいしのフラッシュオーバー電圧で決まる雷サージが線路を進行することになる。

(2) 逆フラッシュオーバー

架空地線または鉄塔に雷撃があった場合に、鉄塔の接地抵抗が高いと鉄塔電位が上昇し、がいしをフラッシュオーバーし、線路導体へサージが侵入することがある。これを鉄塔逆フラッシュオーバーという。

第2-5図は、鉄塔逆フラッシュオーバー発生の機構を説明した図である。雷撃電流 I_L のほとんどが鉄塔を通じて大地に放電されるので、鉄塔塔頂電圧は $I_L \cdot Z_T$ となる。 Z_T は鉄塔電位上昇インピーダンスで、鉄塔インダクタンスおよび鉄塔接地抵抗より定まる値である。逆フラッシュオーバーを起こすがいし部分、すなわち、上アーム電圧は

補正率 K を考慮した値 $K \cdot I_L \cdot Z_T$ となる。

一方、線路導体の電圧は、架空地線よりの誘導電圧 $C \cdot I_L \cdot Z_T$ (ただし C は架空線と線路導体との結合率) および交流電圧波高値 E の和となる。がいしの両端、すなわちアークホーンに加わる電圧 V_0 ががいしまたはアークホーンのフラッシュオーバー電圧以上であれば逆フラッシュオーバー現象が発生する。

この逆フラッシュオーバー電圧および逆フラッシュオーバー発生電流は次式で表される。

$$V_0 = I_L (K - C) Z_T + E \quad (2.1)$$

$$I_L = \frac{V_0 - E}{(K - C) Z_T} = \frac{kV - E}{(K - C) Z_T} \quad (2.2)$$

ただし、 V_0 : アークホーンのフラッシュオーバー電圧 [kV]

I_L : 逆フラッシュオーバー発生電流 [kA]

V : アークホーン50%フラッシュオーバー電圧 (標準波 $1 \times 40 \mu s$) [kV]

E : 交流電圧波高値 [kV]

k : 補正係数 (通常 1.193 がとられる)

K : 上アームの鉄塔内電位上昇率

C : 架空地線と線路導体との結合率

Z_T : 鉄塔電位上昇インピーダンス [Ω]

第2-2表 鉄塔逆フラッシュオーバー発生電流

公称 電圧 [kV]	BIL [kV]	交流電圧 波高値 E [kV]	アークホーン50%フラッシュオーバー電圧[kV]					上アーム の鉄塔内 電圧上昇 係数 K	架空地線 と本線と の結合係 数 C	鉄塔電位 上昇イン ピーダ ンス $Z_T(\Omega)$	逆フラッ シオーバ 発生電流 $I_L(\text{kA})$
			代表値 $V(\text{kV})$	波頭 補正 係数	波尾 補正 係数	大気 係数	総合補 正係数 [k]	補正 値 [kV]			
154	750	131	850	1.05	1.25	$\frac{1}{1.1}$	1.193	1014	0.8	0.25	55.4
110	550	94	600	1.05	1.25	$\frac{1}{1.1}$	1.193	716	0.8	0.25	39.0
77	400	66	450	1.05	1.25	$\frac{1}{1.1}$	1.193	537	0.85	0.25	28.0
60	350	56	400	1.05	1.25	$\frac{1}{1.1}$	1.193	477	0.85	0.25	25.1

注. (1) $E = (\text{回路の最高電圧}) \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$ (2) 波形補正は標準波形 $(1 \times 40 \mu\text{s}) \times (2 \times 5 \mu\text{s})$ を考慮した。

(3) 架空地線条数は2条

(2・2)式により各公称電圧の代表的な鉄塔について試算すると第2・2表のとおりとなる。この場合のアークホーン50%フラッシュオーバー電圧は、その線路の接続される発電所の出インパルス絶縁強度 (BIL) の 110~120% を目安とし、鉄塔電位上昇インピーダンスは波頭長 $2\mu\text{s}$ および鉄塔塔脚接地抵抗を 10Ω と想定して求めている。

(3) 径間逆フラッシュオーバー

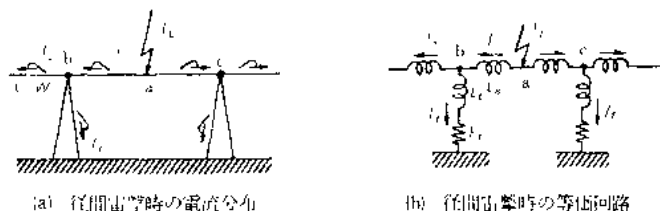
第2・6図のように径間中央部の架空地線が雷撃を受けた場合に、架空地線から直接、線路導体に向かって発生する逆フラッシュオーバーを径間逆フラッシュオーバーという。まれではあるが、急波頭しゅん度の雷撃が長径間中央にあった場合に、鉄塔からの反射波が到着する以前に雷撃点 a の電位が非常に高くなり、架空地線から線路導体に向かって逆フラッシュオーバーが発生する。雷撃の波頭しゅん度を $S[\text{kA}/\mu\text{s}]$ 、架空線のサージインピーダンスを $Z[\Omega]$ 、径間距離を $l[\text{m}]$ とすると、径間中央の雷撃点電位は、塔脚接地抵抗が架空線のサージインピーダンス Z に比し小さい場合に、次式で表される。

$$E_m = -\frac{l}{300} \left(\frac{Z}{2} \right) S [\text{kV}] \quad (2\cdot3)$$

また最大電圧 E_m に達するまでの時間 t はつぎのとおりとなる。

$$t = l / 300 [\mu\text{s}] \quad (2\cdot4)$$

$Z = 500[\Omega]$ 、 $l = 300[\text{m}]$ 、 $S = 10[\text{kA}/\mu\text{s}]$ とすれば、 $E_m = -2500[\text{kV}]$ 、 $t = 1[\mu\text{s}]$ となる。このように、径間の架空地線-線路導体間の絶縁距離を十分とらないと、架空地線しゃべい



第2・6図 径間逆フラッシュオーバー

が無意味になるおそれがある。

以上から線路の雷によるフラッシュオーバーを防止するには、

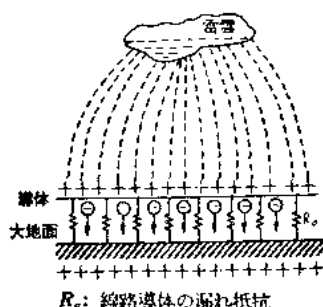
- (i) 架空地線により線路導体を十分にしゃへいし、直撃を受けないようにする。
- (ii) 塔脚接地抵抗をできるだけ低い値に施工する。
- (iii) 架空地線と線路導体の間に十分な絶縁距離を保つ。
- (iv) 鉄塔電位上昇によって逆フラッシュオーバーの生じないようがいし係数を選定する。

ことが重要となる。

しかし、大きなエネルギーをもつ自然雷に対していかなる場合でも線路に雷サージが侵入しないようにすることは、経済的にも技術的にも不可能に近く、適切な防雷設計を施すとともに避雷器などの雷防護装置を併用することが実用的である。

2-2-3 誘導雷

誘導雷とは、雷雲間の放電または雷雲から大地への放電により線路導体に異常電圧が誘起さ



第2-7図 雷雲による拘束電荷の生成
(雷雲が負極性の場合)

れる現象をいう。第2-7図に示すように雷雲が線路導体の上空に発生すると、静電誘導によって導体の雷雲に近い側には雷雲と反対極性の電荷が生じ導体の大地側には同極性の電荷が生じる。このうち線路導体の大地側に生じた電荷は中性点あるいは漏れ抵抗を通じて大地に逃げ去るので、導体の雷雲に近い側に生じた正極性電荷が雷雲によって導体上に拘束される。雷雲が雲間または大地との間に放電して電荷が消失すると、その放電状況に応じて線路導体上の拘束電荷が自由電荷となり左右に分かれて光速で進行する。

このようにして線路導体～大地間に生ずる電位差が誘導雷である。このときの線路導体の最高電位 V は次式で表される。

$$V = \alpha E_0 h \text{ [kV]} \quad (2-5)$$

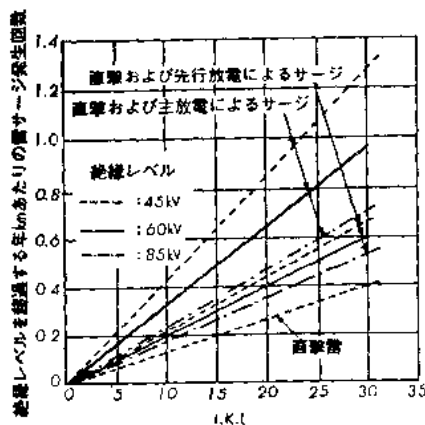
ただし、 E_0 : 雷放電前の地表面付近の雷雲による電界強度 (雷雲による電位傾度と考えてよい) [kV/m]

h : 線路導体の地上高 [m]

α : 拘束電荷および雷放電状況で決まる定数で1より小さい (結合係数)

電界強度 E_0 は、線路近傍への大地への放電の場合には最大100 kV/mに達することもあるが、一般には高くとも30~40 kV/m、遠雷の場合は0.2~0.3 kV/m程度である。

結合係数は、通常0.2~0.3程度で66 kV以



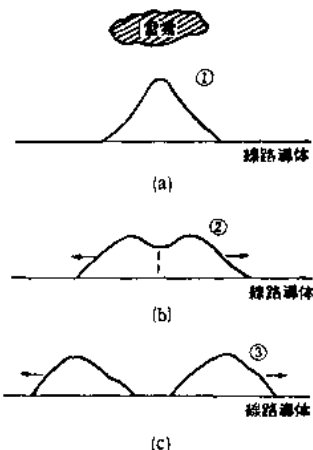
第2-8図 雷雨日数と雷サージ予想発生回数
(I.K.L.=30, $n=4$ 回/km²/年を基準とした)

1) の送電線では誘導雷サージが機器の絶縁を脅かすことはない。

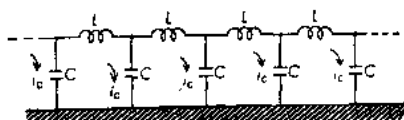
しかし、配電線や 3/6kV 級変電所では機器の絶縁耐力が低いので対策が必要となる。第 2・8 図は 3/6kV 級配電線におけるそれぞれの誘導雷サージが BIL を超過する年 1km あたりの雷サージ発生回数を直撃雷の場合と共に示したものである。直撃雷よりはるかに誘導雷サージのほうが発生確率が高いことがわかる。

また誘導雷サージの波形は、実測によると波頭長は 10 μ s と長く、波尾長も 50~100 μ s と長い。これは雷雲の電荷を中和するに長時間を要するためと説明される。

しかし、誘導雷サージでも落雷点が線路にきわめて近い場合には急しゅん波サージとなる場合がある。これは、落雷途上の空中電界の急激な変化の結果発生するもので、波頭部分に急しゅん波サージが重畳するからと説明されている。



第 2・8 図 誘導雷サージ



第 2・10 図 線路の等価回路と進行波

2.3 進行波

2.3.1 進行波の原理

雷撃などにより生ずるサージ性異常電圧は、あたかも、水面に石を投じたとき生ずる波のように、進行波となって線路を進行する。異常電圧から機器を保護するためにはその性質を十分知っていなければならない。

第 2・9 図は誘導雷サージが進行波となるさまを概念的に図解したもので、拘束電荷①が雷雲の放電により自由電荷②となり、進行波③として線路左右に伝播する。線路はその抵抗分を無視すると、第 2・10 図に示すように、インダクタンス L と対地静電容量 C とが梯子状に連続する分布定数回路となる。雷サージすなわち進行波は、これらのインダクタンス L を介して対地静電容量 C を充電しながらつぎからつぎへと進行していくものと考えられる。つぎに進行波の性質について検討を進める。いま、線路の単位長さを dx [m]、単位長さの静電容量を C [F/m]、単位長さのインダクタンスを L [H/m]、進行波が単位長さを進行する時間を dt [sec]、サージ電圧を e とすれば、 dx 間に蓄積される電荷量 dq は次式で求められる。

$$dq = eCdx [\text{Coulomb}] \quad (2.6)$$

充電電流として流れる電流 i は電圧量 dq の時間的変化の割合であり、

$$i = \frac{dq}{dt} = eC \frac{dx}{dt} = eCv [\text{A}] \quad (2.7)$$

となる。ところで電圧 e は電流 i の時間的変化の割合であり、

$$e = L \frac{di}{dt} = L \cdot i \cdot \frac{dx}{dt} = L \cdot i v \quad (2.8)$$

となる。

(2.7)、(2.8) 式よりインピーダンス Z は

$$Z = \frac{e}{i} = \frac{1}{Cv} = Lv = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (2.9)$$

となるがこれをサージインピーダンスといい、サージが進行していくときのインピーダンスとしての作用をもつ。また伝播速度 v は (2.9) 式から

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} [\text{m/s}] \quad (2.10)$$

となる。

つぎに架空線およびケーブルのサージインピーダンス、伝播速度を求めてみよう。

(1) 架空線のサージ特性

サージインピーダンスおよび伝播速度を求めるには、まず、単位長さあたりのインダクタンス L と、静電容量 C を求めなければならない。 L は進行波の場合は表皮効果が大きいので導体の内部インダクタンスは無視できる。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\mu_0}{2\pi} \log_e \frac{2h}{r} \quad [\text{H/m}] \\ C &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\log_e \frac{2h}{r}} \quad [\text{F/m}] \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

ただし、 r : 導体半径 [m]

h : 導体の地表高さ [m]

μ_0 : $\mu_r \times 4\pi \times 10^{-7}$

ϵ_0 : $\epsilon_r \times \frac{1}{4\pi} \times \frac{1}{9} \times 10^{-9}$

空気中では比透磁率 $\mu_r=1$ 、比誘電率 $\epsilon_r=1$ となる。したがってサージインピーダンス Z および伝播速度 v は

$$\left. \begin{aligned} Z &= \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \times \frac{\left(\log_e \frac{2h}{r}\right)^2}{(2\pi)^2}} = 60 \log_e \frac{2h}{r} [\Omega] \\ v &= \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \sqrt{9 \times 10^{16}} = 3 \times 10^8 [\text{m/s}] \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

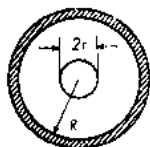
となる。

すなわちサージインピーダンス Z は導体の半径 r と高さ h により決まる値となり、長さには無関係となる。また伝播速度 v は光速度と等しくなる。

(2) ケーブルのサージ特性

第2.11図に示す中心導体の直径 $2r$ 、シースまでの半径 R の単心ケーブルの場合、次式で L 、 C が求められる。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\mu_0}{2\pi} \log_e \frac{R}{r} \\ C &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\log_e \frac{R}{r}} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$



第2.11図 ケーブルの構造

ケーブルの比誘電率を ϵ_r とすると、

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_e \frac{R}{r} [\Omega] \\ v &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \times 3 \times 10^8 [\text{m/s}] \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$