

低圧回路網における SPD のシステムに適合した適用 コンピュータ・シミュレーション

Josef Birkel, Peter Hasse, Peter Zahlmann, ETZ (ドイツ電気学会誌 1994 Heft 17)

エース国際技術コンサルティング(AITEC) 竹谷 訳

著作権は AITEC が保有していますので無断転載を禁じます。

1. はじめに

最新の高集積度の電子システムはあらゆる工業分野で使用されており、回路網の供給信頼性に対する要求も高まっている。導電結合及び電磁並びに静電結合による妨害に対する電子システムの耐力の低下にも拘わらず、この要求に対応するために、常により複雑な保護手段が求められてきた。その場合に考慮されるべき妨害源の種類は、直撃雷から低圧配電網における開閉により引き起こされる振動現象に及んでいる。EMC に関するこの広範囲な目標は過電圧保護をますます重要なものとしている。EMC の観点から正しい保護方針の枠内で、過電圧保護の計画と実施をする上で、協調のとれた保護システムを構成しなければならない。このためには、保護対象端末機器を含めて全低圧設備の危険パラメータの検討から始める。今日でもなお、SPD は相互に無関係に、かつ協調もせずにシステムに設置されればよいという誤った考え方が横行している。このような方法は SPD の効果を害するか又は目標の保護レベルに達するのを放棄することになる。異なった保護手段の効果的な仕様の本質的な前提条件は、保護対象空間の全体を段階的な要求に従って分割する秩序正しい原理にある。そのために EMC による雷保護領域のコンセプトが選ばれる。

それは、雷による 1 次妨害から端末機器の耐力に至るまで、個々に設置されるべき SPD に加わるそれぞれのストレスの大きさの確認を可能にする。

2. 雷保護領域 LPZ のコンセプトによる直撃雷用 SPD と誘導雷用 SPD の適用

LPZ 0 では直撃雷電流が導体に流れ、同時にそれによる電磁界が発生する。導体を流れる直撃雷電流は第 1 雷撃の波形 $10/350 \mu s$ 、後続雷撃波形 $0.25/100 \mu s$ 、長時間雷撃 $0.5s$ である。これらの第 1 次的妨害は LPZ0 から LPZ1 への境界において、直撃雷用 SPD により LPZ1 で許容される値に低減されなければならない。

LPZ1 では直撃雷用 SPD 動作後にシステムに残留する妨害及び雷電流による磁界により発生する妨害並びに開閉過電圧が発生する。LPZ1/2 の境界に設置された SPD はこれらの妨害過電圧を LPZ2 において許容値に低減するように設計されなければならない。LPZ3 では、過電圧がそこに設置された機器の耐力 (EMC で証明された) を超過してはならない。その結果、全設備に最適な保護を行うことができる。

個別のエレメントとしての異なった SPD についての、ここで述べられている要求事項に追加して総合的な保護手段のシステム特性から、さらに要求事項が必要となる。このシステムに関する要求事項は、保護エレメントの実効性と負荷を調整し、その結果、全設備に対する最適な保護が実現される。

3. 異なった SPD 相互間の協調

保護対象システムに個々に多段に接続された SPD に対する要求事項は雷保護領域のコンセプトから決められる。その場合、個別の SPD 間の協調の計画は、これらの段階によってシステムに侵入した例えば雷電流分流分が、又は内部で発生した開閉過電圧が、保護対象の端末機器の耐力限界以下に低減されるようにしなければならない。

この問題解決のために現在は一般的に通用する規格は無く、実際には異なった協調手段の多くの方式が適用されている。SPD 協調の可能性の討論の際に、分かりやすいように簡単な仮定をするか、又は全システムの一部が考慮されている。複雑なシステムでは多額の費用で、または部分的に検証の放棄によって行われる。特に低圧回路網の SPD の場合には、追加して接地設備、回路形態、接続ケーブル及び上位の高圧回路を考慮しなければならない。このような影響はコンピュータ・シミュレーションにより把握することができる。種々の適用の場合のシミュレーションは保護器の必要な能力及びその反作用を解明できる。

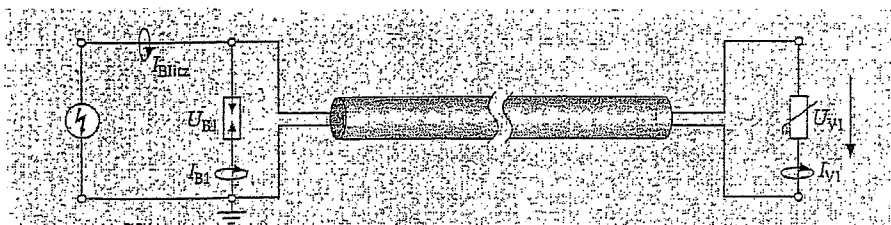
4. コンピュータ・シミュレーション SPD 協調のためのエンジニアに適した道具

今日市販の回路網解析プログラムはこのような用途のために、既に実行可能なモデルを提供している。それ故、R, L, C の集中定数エレメント及び複数導体ケーブル-周波数依存の損失の有無もふくめての模擬定数が決められていて、問題なく使用できる状態にある。これらに対し SPD シミュレーションのために必要とされるバリスタ及びギャップは実際に使用される部品に適合し、計算に組み入れられなければならない。

酸化亜鉛バリスタのモデルは二つの電流領域に分けなければならない。

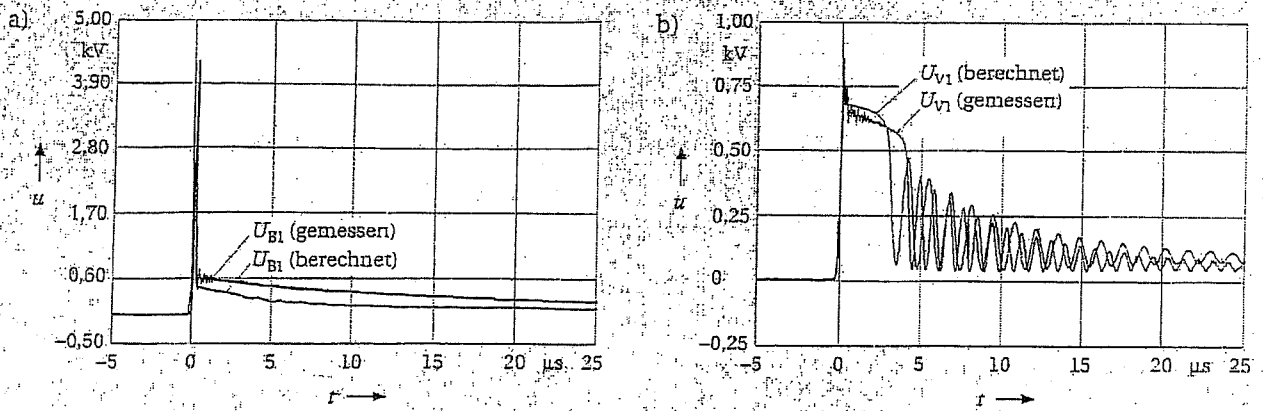
- 漏洩及び動作領域 (μ A から数 kA) 非直線電圧依存抵抗 (対数関数) によりシミュレートされる。
- 大電流領域 (数 kA 超過) では通常の抵抗となる。すなわち非直線エレメントの影響は小さい。

バリスタの全体モデルは接続線インダクタンス並びに酸化亜鉛円盤の固有キャパシタンスにより完結される。この簡単なバリスタ・モデルにより、十分に正確なシミュレーション結果を得ることができる。なおギャップモデルについては多面的な要求がある。SPD の動的点弧動作が、インパルス電流放電現象中、大電流領域において正確に模擬されなければならない。さらに設定された続流に対するギャップの遮断特性も模擬されなければならない。これらの要求は一連の物理的及び数学的問題を使用者に提示し、個別のシミュレーション経過において全ての部分現象を把握することができる。それ故、シミュレーション・モデルの能力は比較的簡単な実験により検証出来る構成で実証しておくことが推奨される。図1はこのような試験構成の原理的等価回路をしめしており、図2は回路の種々な点についてのシミュレーションと測定結果を示している。



雷電流電源 10/350 直撃雷用 SPD B1 減結合導体 誘導雷用 SPD V1
 I_{blitz} : 全雷電流、 I_{B1} : SPD B1 の電流、 I_{V1} : SPD V1 の電流、 U_{B1} : SPD B1 の電圧
 U_{V1} : SPD V1 の電圧

図1 コンピュータ・シミュレーションと測定結果比較のための回路構成



gemessen: 測定結果 berechnet: コンピュータ・シミュレーション

a) SPD B1 の電圧 U_{B1}

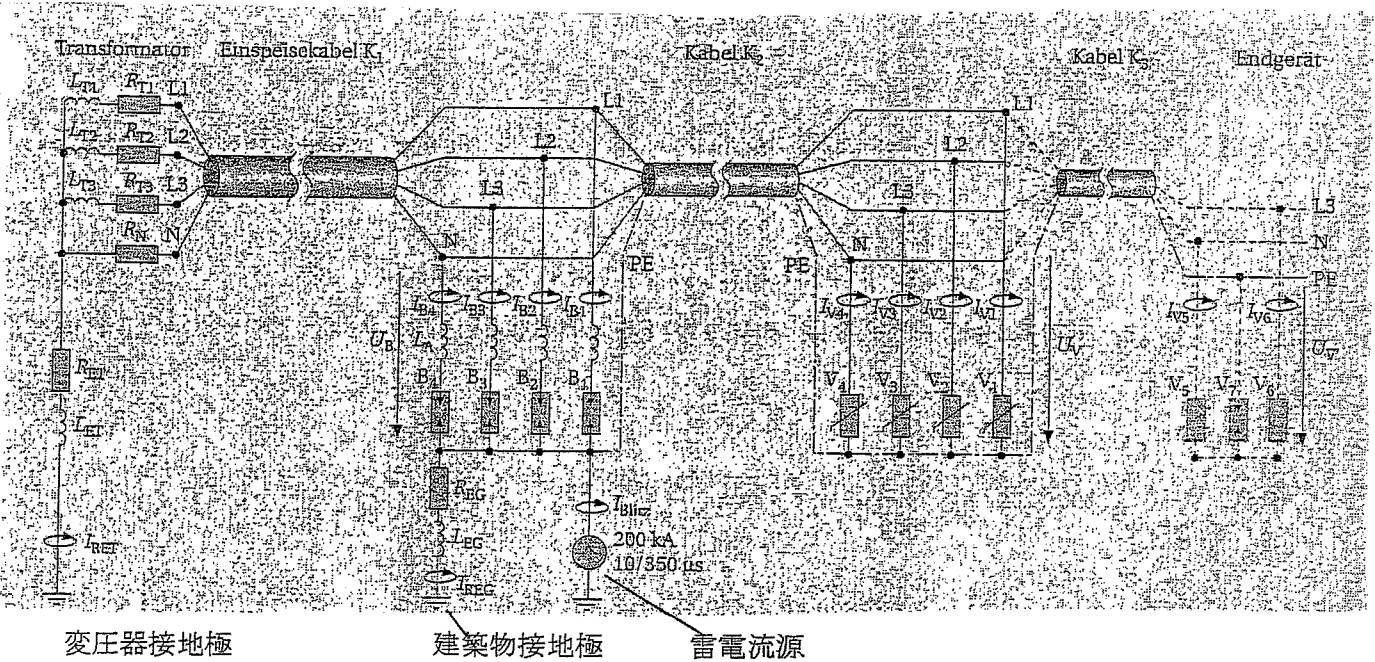
b) SPD V1 の電圧 U_{V1}

図2 図1の回路構成によるコンピュータ・シミュレーションと測定結果比較

5. 回路構成の検討

最近の低圧配電設備はケーブル配電が多くなっている。このことは建物が直撃雷を受けた場合のシミュレーションで考慮しなければならない。この場合、注入される雷電流は、受雷装置から引き下げ導体を経由して流れ、一部はローカルの接地極を通じて大地へ、また残りは配電ケーブルを通じて電源の接地極へと流れる。図3はこのようなシミュレーションの等価回路を示している。

変圧器 配電ケーブル K1 配電ケーブル K2 配電ケーブル K3 端末機器



変圧器接地極

建築物接地極

雷電流源

図3 TT-システムのコンピュータ・シミュレーションのための等価回路

当該建築物及び変電所の接地極は、いずれも $L_E = 5 \mu\text{H}$ 及び $R_E = 3 \Omega$ のインピーダンスにより接続されている。このシミュレーションに用いられた 400 kVA の変圧器のデータは、平均的なものを採用しており、巻き線インダクタンス $L_T = 50 \mu\text{H}$ で抵抗分は $5 \text{m}\Omega$ である。N 導体については $R_N = 2 \text{m}\Omega$ を用いた。直撃雷用ギャップ形 SPD として B1, B2, B3, B4 が設置され誘導雷用としてはバリスタ形 SPD V1, V2, V3, V4 が設置されている。

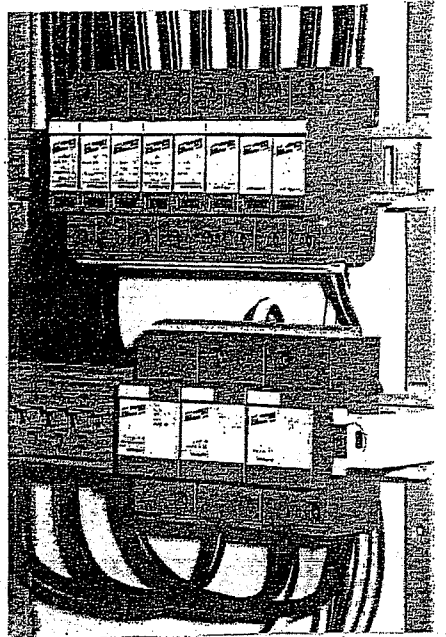


図 4 電力回路に設置された SPD の事例
 (下側 直撃雷用ギャップ形 SPD、LPZ 0A → 1 の境界に設置)
 (上側 誘導雷バリスタ形 SPD、上記と組み合わせ制限電圧を更に低減するか又は LPZ 1 → 2 の境界に設置)

計算に際しては波形 $10/350 \mu\text{s}$ のエネルギーの大きな第 1 雷撃の直撃雷電流をシミュレートした。そうすることにより、インパルス電流の振幅のみでなく SPD のエネルギー吸収能力も検討することができる。

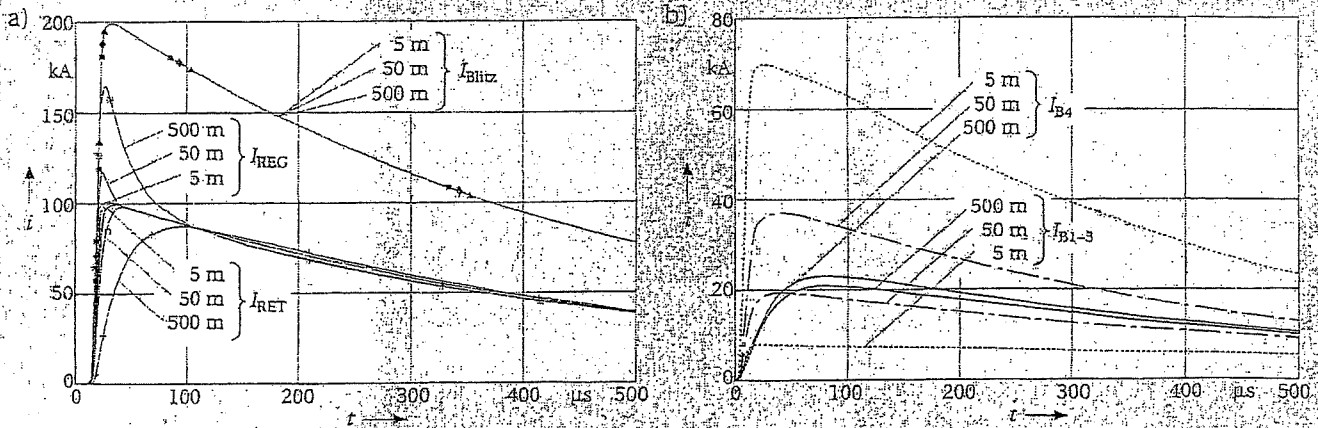
この一般的等価回路は、個別のエレメントの相互作用と影響要因の研究に役立つ。以下の事例においては、SPD をシステムに適合した使用をする際のいくつかの問題が解析される。

6. 個別の SPD の雷電流通電分担に及ぼすケーブルの影響

この計算の基本条件は図 3 の回路構成によっており、ケーブルの長さ KL を 5 m から 500m の間にあるとする。

200 kA ($10/350 \mu\text{s}$) と仮定した直撃雷電流 I_{Blitz} の当該システムにおける分流状況は、図 5 に示されている。図 5 a はインパルス電流の初期段階において、配電ケーブルのインピーダンスが、雷電流の分流にどのような影響を及ぼすかを示している。まず直撃雷を受けた建物の接地極を経由して雷電流の大きな部分が短時間に流れる。インパルス電流の波尾の領域では電流変化速度が小さいので、雷電流は回路の抵抗の逆比で分流する。

この準安定状態における分流は接地抵抗の比率により決められ、回路のトポロジーには殆ど無関係である。



a) 全雷電流と雷電流分流分

IBlitz 全雷電流

IREG 建物の接地設備の雷電流分流分

IRET 変圧器接地設備の雷電流分流分

b) 直撃雷用 SPD を流れる雷電流分流分

IB1-3 : 相電線の直撃雷用 SPD の分流分

IB4 : N 導体の直撃雷用 SPD の分流分

図5 (図3による) 全システムと直撃雷用 SPD の電流分布に及ぼす配電ケーブルの長さの影響

長いケーブル長では、直撃雷用 SPD によって雷電流分流分の上昇時間は長引く。雷電流の上昇時間の変化は SPD 間のエネルギー協調をとる場合に注意しなければならない。現在、用いられている協調の方法はインダクタンスによる減結合であり、それは雷電流分流分の電流上昇率 di/dt に基づいている。最新の SPD グループでは、試験確認された直撃雷用 SPD と誘導雷用 SPD の組み合わせが頻繁に実用され、直撃雷用 SPD がインパルス電流の大部分を分担する、すなわちバリスタ SPD が過負荷となる前にインパルス電流を通电してしまう。

図5 b では、このシミュレーションのために、低圧配電系統の相電線 L1, L2, L3 及び N のインパルス電流の分流を示している。

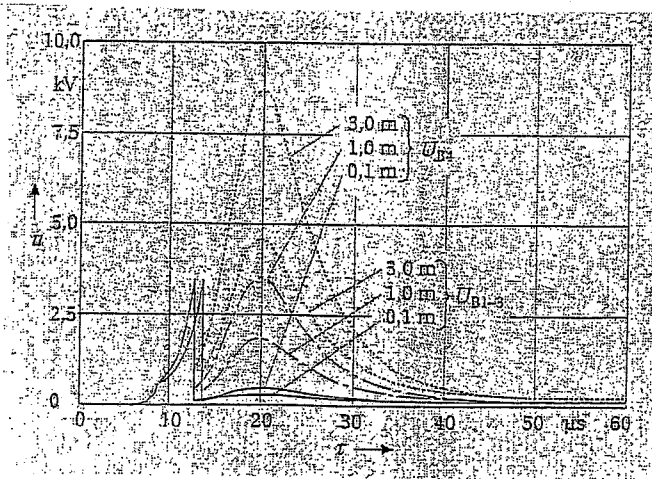
配電ケーブル KI が短くなるにつれて、この場合に仮定した TT-系統では N 線は、L1, L2, L3 よりも大きな分流分を流すようになる。この不均一な電流分布は L1, L2, L3 線に接続される変圧器インピーダンスにより引き起こされる。特に小さな変圧器の場合にはこの傾向が強まる。その結果、設置された直撃雷用 SPD の分担する放電電流の不均一さは大きくなる。それ故、N 線の SPD の分担は 75 kA となり、L1, L2, L3 線に設置されている SPD の分担は 10 kA となる。このようなことは特に電源変圧器と SPD の間がわずか数 m のケーブルで接続されているような場合に工場設備で発生する。短い配電ケーブルの場合のこのような不均一は雷電流の分流状況は、ケーブル長が長くなれば、殆ど完全に是正される。ギャップ形 SPD を並列接続して用いる場合は特別な問題が発生する。アーク電圧の垂下

特性によりアーク動作点の不安定さが発生し、それによって電流分担の動的な移動が起こる。インパルス電流の波尾の領域では、インダクタンスの均等化作用が失われる。残留電流の大部分は一つのギャップでのみ分担されることが発生する可能性がある。この現象はアーク電圧と回路条件に依存する。それ故、ギャップ SPD の並列接続の場合には、特に長い波尾長を持つ場合には、全体の放電電流の現象について均一な分流を前提としてはならない。

7. SPD 接続線の長さの影響

SPD の設置に際して、屢々長い接続線が用いられる。以下のシミュレーション例では、0.1 m から 3 m までの長さの接続線のインダクタンスの作用を調査した。長い接続導体の決定的な欠点は図 6 に示されている。SPD が動作した後に大きなインダクタンスにおいて、そこを流れるインパルス電流により SPD の保護レベルを遙かに超過した電圧が発生する。数 μs の時間この過電圧は継続し、設備の過電圧耐量を超過する。ここに記録された電圧値は SPD の接続線の長さはできるだけ短くしなければならないことを示唆している。

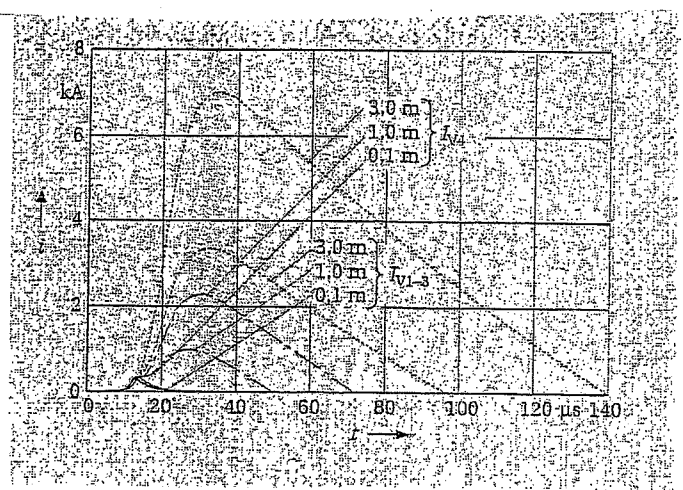
接続線が長い場合には、雷保護レベルの超過に加えて別の問題を発生する。図 7 に誘導雷用バリスタ形 SPD V1 から V4 に流れるインパルス電流分流分が示されている。直撃雷用 SPD の接続電線インダクタンス LA の電圧降下は誘導雷用バリスタ SPD を経由する電流の通過時間を長引かせる。その際、バリスタのエネルギー吸収能力は直撃雷用ギャップ SPD に比較して非常に小さいので、バリスタを過負荷にする。短い接続電線長の場合にのみ、侵入する雷電流波形 $10/350 \mu s$ を直撃雷用 SPD の放電ギャップの動作によって、バリスタ形 SPD に適切なインパルス電流波形 $8/20 \mu s$ に短縮することが出来る。



UB1-3 : 相電線の SPD 接続線の電圧降下

U4: N 線の SPD 接続線の電圧降下

図 6 直撃雷用 SPD 接続線の電圧降下



IV1-3:相電線の誘導雷用 SPD の分流分

IV4: N 電線の誘導雷用 SPD の分流分

図 7 直撃雷用 SPD 接続線長が誘導雷用 SPD の電流分布に及ぼす影響

8. 端末機器に至るまでの過電圧保護の協調

過電圧保護のシステムに端末機器の過電圧保護を取り込む場合にも問題が発生する。調査のために図 3 においてシミュレーション・ネットワークが点線（端末器保護として用いられる結線）のように拡張された。開閉過電圧に対する良好な保護を得るために、充電

線間にバリスタが設置された。PE 線に対する過電圧保護はガス放電管により保証されている。この保護結線の対称性故に、これは屢々移動機器の保護にも用いられる。

シミュレーションのために個々のエレメントについては実際に用いられる設計のものが選定された。図 8 には適切な協調がとれていない SPD のシミュレーション結果が示されている。ガス放電管 SPD V7(図 8a)の電圧経過が示すように、このエレメントは直撃雷用 SPD が動作電圧に達する前に動作している。この誤った協調の結果として、大きな直撃雷電流分流分が端末機器直近の SPD 接続線に流れる。このために単にエネルギーの小さい開閉過電圧に対して設計された SPD は過大な過負荷を受けることになる。(図 8b)

また当然のことながら、過大な容量の SPD をここに設置しても、EMC の観点から適正な解決とはならない。最適な協調の場合には、直撃雷用 SPD は、充電線と PE 間に加わる雷により発生した過電圧を、LPZ0 から LPZ1 への移行点で制限しておかなければならない。その際に機器保護に対して悪い影響を与えるようなことがあってはならない。

これらの SPD の適正な多段適用は、細心の注意を持って協調のとられた SPD の同一製品ファミリーによって初めて実現出来るのである。

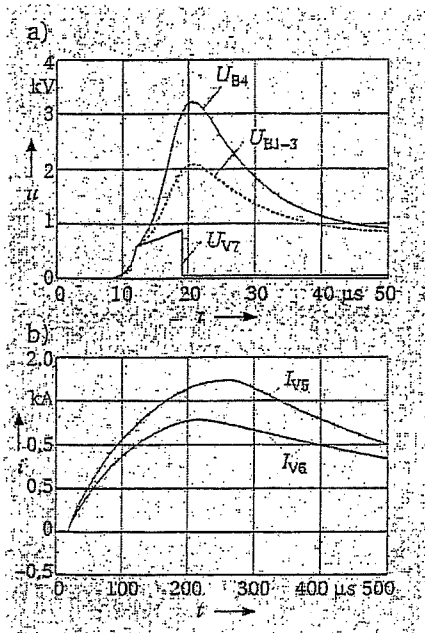


図 8 SPD 間で適正な協調がとれていない場合、直撃雷用 SPD 分岐線における電圧降下の経過と端末機器直近の SPD を通過する直撃雷電流分流分

a) 電圧

b) 電流

UB1-3 :相電線の直撃雷用 SPD 分岐線の電圧降下

UB4: N線の直撃雷用 SPD 分岐線の電圧降下

UV7: 端末機器直近のガス放電管 SPD での電圧降下

IV5: N電線の端末機器直近の SPD に流れる直撃雷電流分流分

IV6: 相電線の端末機器直近の SPD に流れる直撃雷電流分流分