1000kV系統の保護方式の基本検討

正員 鈴木 守 (東京電力)

正員 松田 高幸 (東京電力)

正員 稲垣 恵造 (日立)

正員 佐々木 宏 (日立)

非会員 臼井 正司 (三菱)

正員 堀 政夫 (東芝)

Study of Protection Scheme for 1,000kV Networks

Mamoru Suzuki, Member, Takayuki Matsuda, Member (Tokyo Electric Power Company)
Keizou Inagaki, Member, Hiroshi Sasaki, Member (Hitachi, Ltd)
Masaji Usui, (Mitsubishi Electric Corporation), Masao Hori, Member (Toshiba Corporation)

In Japan, electric power systems are developing with economical growth. Especially, the recent demand of electrical power in metropolitan area becomes 2.6 times as much as in 1973 when 500kV system was first applied. It is expected that trends of increasing power demands may continue in future. To satisfy this demand, Utilities developed new transmission lines to make networks so substantial and aimed stable and efficient operation of the power system. However, this countermeasure caused extremely large fault currents at the substations where large power sources are concentrated. Problems such as large fault current beyond interrupting capacity of circuit breaker or electromagnetic interference now become very severe. To solve these difficulties, Tokyo Electric Power Company is going to develop 1,000kV networks. Those increase the capacity of transmitted power and suppresses the fault current level by splitting the 500kV system in several parts. Considering the associated difficulties to 1,000kV networks such as increasing capacitive current on transmission line, prolonged D.C. time constants due to large diameter of conductors and other electrical characteristics of 1,000kV networks, we examine the applications of the reliable protection system. The results are summarized as follows.

- 1) To adopt multiple phase autoreclosing with high speed grounding switches to suppress secondary arcing on faulted phases
- 2) To adopt air core type CT for 1,000kV busbar protection as a countermeasure against CT saturation
- 3) To adopt the current comparison scheme to realize sensitive protection for paralleled transformer bank.

New protection system would be tested in field from 1995.

キーワード; 1000kV系統保護, 高速接地式多相再閉路, 過電圧保護, 空心CT, 母線保護, 変圧器保護

1. まえがき

わが国の電力系統は、経済の堅調な成長に伴って年々規模の拡大を続けており、特に、首都圏を供給区域とする東京電力管内においては、500kV系統導入当初(1973年)の需要2100万kWに対して1992年には5410万kWと約2.6倍もの規模に達しており、緩急の差はあるものの長期的には今後もこの増加傾向は変わらない。

この需要増加に対応するため大容量の電源が積極的に開発されてきたが、立地環境面から遠隔地に集中偏在せざるを得ず、その大電力を需要中心まで効率的にかつ安定に送電するための基幹流通設備の強化対策を合わせて講ずる必要があった。

このため、新しい送電ルート確保による強固な500kVグリッドシステムの構築、その系統・設備の効率運用・安定運用対策が推進されてきたが、今後新しい送電ルートはそう多くは期待できないため、現状対策方法の延長線上で今後の需要増加に対応していくことは困難である。また、このような対策方法は、系統全体、特に大容量電源系統の集中する拠点変電所の短絡・地絡電流の著しい増大を招くことになり、遮断器の遮断能力不足、電磁誘導障害等様々な問題が生ずるので、適正な抑制策が必要になる。

以上のような技術的諸課題の抜本的対応策として進められているのが1000kV系統の導入計画であり、基幹流通設備送電能力の飛躍的増大と、1000kV系統を骨格としながら一部の500kV系統を分割することによる短絡・地絡電流の抑制が図れる。

本稿では、送電電圧の格上げに伴う充電電流の大幅な増大や、電線の太径化に伴う事故電流直流分の減衰時定数の長時間化など、1000kV系統特有の電気的特性の特徴を踏まえながら、将来基幹系統の骨格となる1000kV系統の高信頼度な保護方式の検討結果について述べる。

2. 1000kV系統の電気的特性と保護上の課題

1000kV系統は、西暦2000年代の首都圏地域への電力供給の骨格となるものであり、その送電電力も1ルートあたり8~13GWと極めて大きいため、500kV系統にも増して、高い信頼度確保が必要である。

また、1000kV系統導入以降の電気的特性は、図1に示すように大きく変化するので、次のような技術課題への対応が必要である。

図1 1000kV系統とその周辺系統の特性変化
Fig.1 Phenomenon to be considered in 1000kV and adjacent networks

(1) 事故時の過渡振動電圧・電流の低周波化

系統事故時に発生する過渡高調波は、1000kV系統及びそれとほぼ同時期に導入される500kVケーブル系統など、系統の充電電流の大幅な増大に伴って益々低周波化する。従来、この過渡高調波の次数は、基本波の3倍以上であり、保護演算は基本波をベースに、一部励磁突入現象検出等に2倍周波成分を用いていただけなので、フィルターで過渡高調波を十分除去することにより、保護性能への影響はほとんどなかった。

しかしながら、過渡高調波が2倍周波近傍まで低くなると、フィルターで基本波成分のみを抽出するために距離リレー等の動作時間の遅延を生じたり、変圧器内部事故時に励磁突入現象と見誤って不動作となるなどの影響がでてくる。このため、距離リレーについては、LR数値演算形の開発により、2倍周波成分が含有されても誤差が生じないようにになっているので、後者の対応が必要である。

(2) 2次アーク消弧時間の遅延

1000kV送電線は各相間の静電容量が大きいので、事故相を遮断しても隣接健全相からの静電誘導電流によって事故点のアークが数秒以上続き、風速などの周囲条件によっては消弧しない場合もある。このため従来技術では2次アークの自然消弧に期待できないので、高速再閉路が著しく困難になる。事故時の連系確保には高速再閉路の採用が不可欠であり、2次アークの消弧時間を早め、従来と同等の再閉路時間を確保する必要がある。

(3) 持続性交流過電圧の発生

1000kV長距離送電線は充電容量が大きいので、何らかの原因によりルート断が発生し、電源が無負荷1000kV送電線を含み単独系統となると、発電機の加速、フェランチ効果により電圧が上昇し、持続性の交流過電圧が発生する。発生する過電圧は2回線遮断した端子の線路側で約1.5pu程度まで上昇し、1000kV系統設備の破壊、特に高性能避雷器の破壊に至る恐れがあり、過電圧保護が必要となる。

(4) 過渡直流分減衰時定数の長時間化とCTの磁気飽和対策

1000kV系統の送電線は8導体のため抵抗分が小さく、直流分時定数は約0.2秒(500kV系統の4導体

では約0.08秒)と長く、変圧器や発電機など電源系統を含めた直流分時定数は最大で0.25秒と長くなるので鉄心を使用したCTの磁気飽和は益々顕著となる。このため低負担のデジタル保護制御装置の採用によるCT飽和の低減や、大きな過電流定数の採用等により対応を図る必要があるが、特に母線保護リレーではCTの著しい大形化を招く。

(5) 事故検出感度の低下

1000kV系統は、500kV系統に比べ短絡電流が小さく、送電線各区分ごとの充電電流も無視できない大きさである。このため送電線差動リレーにおける区間内充電電流の高精度補償、逆相距離リレーの採用による常時充電電流の影響除去などの技術が確立され、すでに500kV系統に於いても実用に供しているが、保護リレーにとって充電電流は、地絡・短絡の事故電流とは逆位相となり、事故電流を半減させたり事故方向を誤る要因となる。また1000kV変圧器は、500kV用変圧器に比べ容量で2倍、輸送制限から巻線が2もしくは3組に分割されているため同一ターン比の巻線事故時の電流は500kV用より小さく検出感度は高感度が要求される。

(6) 系統後備保護の遅延

長距離線路と短距離線路が隣接した系統では、長距離線路の後備リレー第2段が短距離線路の対向母線事故時でも動作する整定となる。このため母線保護リレーが不動作の場合でも後備リレー第2段による不要遮断防止の協調時間を長くする必要があり、事故除去時間が遅延するという問題がある。1000kV系統の後備保護リレーは後備リレー第2段の協調を図り、停電範囲の局限と事故除去の高速化が要求される。

3. 母線保護方式⁽¹⁾

<3.1> 1000kV母線保護の課題

1000kV系統の要となる母線の保護は、内部事故時に確実に動作できることはもちろんであるが、その他のいかなる事故、系統異常現象等により誤動作しない極めて高い信頼度が不可欠である。

このためには、母線に接続される全ての端子のCT2次電流を取込んで電流差動原理で事故判定する方式が最適であるが、母線外部至近端事故時の直流分を含んだ大電流によって、その端子のCTの鉄心が飽和して、誤差電流を生じて誤動作するおそれがある。したがって、一般には高インピーダンス形電流差動リレーとして、差動電流に比例した電圧で検出し、CT飽和して誤差電流が生じて、飽和CTの励磁インピーダンスが小さくなって、小さな電圧しか生じないことを利用して、誤動作防止を図る方式が採用されている。

また、複母線の場合、端子の母線への接続状況に応じて電流入力方を切替える必要がある。しかしながら高インピーダンス形では切替時に高電圧を生ずることから、低インピーダンス形を併用して、端子切替中や外部至近端事故で誤

動作しない複母線全体を一括保護する高インピーダンス形と個々の母線に接続される端子の電流のみを切替入力し、どの母線の事故かを弁別する低インピーダンス形の組合せにより保護するのが一般的である。

この方式の誤動作防止の要である高インピーダンス形は内部事故時数千Vに及ぶ高電圧が発生し、安全上の問題とCT 2次回路閃絡により不動作のおそれがあるので、1000 kV母線保護では鉄心飽和のないCTを適用し、母線一括保護を低インピーダンス形とした方式とする。

前述のように1000 kV系統の事故電流過渡直流分減衰時定数は試算では最大0.25 sec程度となる。この条件のもとで、鉄心形CTで従来CTと同一の特性を得るにはCTの大形化を招き、製作上も問題となるため、母線保護用CTにはコアに鉄心を用いない空心CTを採用する。

しかし、空心CTは鉄心を用いないため、外部磁界の影響を受けやすく、また、2次出力が周波数に比例した電圧となることにより、CT 1次電流に高周波が含有された場合に過大電圧が発生するので対策が必要である。

〈3.2〉 空心CTの原理と特徴

空心CTは鉄心CTとほぼ同じ構造であり、単に鉄心が絶縁物の巻き枠に置きかわっただけである。

鉄心CTはコアに高透磁率の材料を用いているため、非飽和状態では励磁インピーダンスが非常に大きく2次回路を低インピーダンスとして、ほぼ短絡状態で使用し1次電流に比例した2次電流を得る。

これに対して、空心CTでは透磁率が空気とほぼ同じで、励磁インピーダンスが小さいため、2次回路を高インピーダンスとしてほぼ開放状態に保ち、1次電流により、確立される電圧（励磁インピーダンスの電圧）を2次出力として用いる。

図2 空心CTの構造および変換原理

Fig. 2 Structure and principle of Liner Coupler

したがって、空心CTは鉄心CTと比較して、次のような特徴を有している。

- (1) 鉄心を使用していないため、飽和することがなく、

2次出力は1次電流に比例して直線的に変化する。鉄心CTに比較し、小型、軽量である。

(2) 2次回路を開路しても、励磁インピーダンスが小さいので鉄心CTの様に異常電圧が発生しない。

(3) 1次電流を微分することにより出力を得るため、2次電圧は1次電流の周波数に比例し、また位相は1次電流と90°だけ異なる。

〈3.3〉 1次導体の偏心・外部磁界の影響

空心CTは、1次電流により発生する磁束だけを厳密に周回積分することができれば、1次導体の偏心や外部磁界の影響を受けないが、実際には巻線の不均一、特に、二次端子引出部近傍の不均一により誤差を生じる。このため、空心CTの試作実験及びシミュレーションにより、影響の定量的評価を行った。

(1) 1次導体の偏心による影響

空心CTの2次巻線と1次導体との位置がずれることにより、2次巻線が検出する磁束の総和に差が生じ、誤差となることが考えられるが、通常の組立て精度であれば誤差1%程度で殆ど影響はない。

(2) 鉄心CTの隣接による影響

鉄心CTが空心CTに隣接して配置されると、空心CTは内部磁束が、鉄心CT 2次巻線の形成する漏れ磁束により、影響を受ける。モデルを使用した試験等では最大事故電流50 kAを考慮しても、誤差は数A以内であり、実用上問題となるレベルではなかった。

(3) 外部事故電流による影響

空心CTにとって最も厳しいのは、GIS外皮に事故電流が1点集中して流れる場合であるが、シミュレーションによれば、この様な場合においても、空心CTの出力は事故電流の1%を少し上回る誤差を生じる程度であった。

図3に上記外部磁界の影響要因を、図4に外部事故電流がGIS外皮に1点集中して流れた場合の誤差の図を示す。

したがって、母線外部の至近端事故で最大事故電流50 kAが流れたとしても、高々500 A以下で、母線保護リレーの目標検出感度2000 Aと比較しても実用上問題ないレベルである。

図3 外部磁界の影響要因

Fig. 3 Effect of external magnetic field

誤差 (%)

図4 外部磁界の影響量

Fig. 4 Effect of GIS sheath current which is 50kA and centerring in one point

<3. 4> 空心CT 2次回路の過電圧抑制策

空心CTの2次回路は、空心CTの励磁インダクタンスLと保護装置をサージから保護するために設けるサージ吸収用コンデンサCの直列共振により、異常電圧が発生する可能性があるため、過電圧抑制策が必要である。この対策として、制動抵抗を空心CTとリレー装置間に挿入することで異常電圧を抑制することとした。

制動抵抗は、空心CT 2次出力インダクタンスのばらつき、制御ケーブル長の違いによる出力変動誤差を抑制する効果があるため、制動抵抗、サージ吸収用コンデンサ静電容量、リレー装置抵抗をパラメータとして、図5に示す等価回路を用いシミュレーションを実施した。

L : 空心CT出力インピーダンス
R1 : 制動抵抗
R2 : リレー装置入力インピーダンス
C : リレー装置サージ吸収用コンデンサ

図5 空心CTの2次等価回路

Fig. 5 Secondary equivalent circuit of Liner Coupler

制動抵抗R₁をパラメータとした場合のリレー入力の周波数特性のシミュレーション例を図6に、リレー盤接続負担抵抗をパラメータとした場合のリレー入力の周波数特性のシミュレーション例を図7に示す。

(dB)

図6 リレー入力の周波数特性(1)

Fig. 6 Frequency characteristic (1) of Relay input

(dB)

図7 リレー入力の周波数特性(2)

Fig. 7 Frequency characteristic (2) of Relay input

保護リレー装置内のアナログフィルタについては、基本周波数以外での減衰を十分確保するため3次ローパスフィルタ構成とし、空心CT 1次側より見て等価的にバンドパスフィルタ特性となる構成とした。アナログ部の総合周波数特性を図8に示す。

(dB)

図8 アナログ部の総合周波数特性

Fig. 8 Total frequency characteristic of Analog circuit

その結果、全デジタル屋外分散形システムとして、

サージ吸収コンデンサ	0.25 μ F
リレー入力抵抗	6 k Ω
空心CT〜リレー装置間距離	100 m
接続リレー装置数	3装置

を考慮しても、制動抵抗を390 Ω とすれば、1~2 kHz以上の高周波領域のゲインを抑制し、かつ、制御ケーブルの電圧降下誤差、接続リレー装置数の変化による誤差を抑制できる見通しを得た。

＜3.5＞ 空心CTの定格

1000kV GISに適用される空心CTの定格は、GIS定格電流、および故障発生時の2次発生電圧が保護リレー側にとって過電圧とならないこと等を考慮して、表1の様に設定した。

表1 空心変成器の定格
Table.1 Rating of Liner Coupler

定格1次電流	8000A
定格2次電圧	20V
定格周波数	50Hz
誤差	1% (2000A~8000A)
定格耐電流	50KA、2秒

4. 変圧器保護⁽²⁾

＜4.1＞ 1000kV変圧器の保護上の特徴

1000kV変圧器保護においては、2倍周波電流成分に影響を受けない内部事故と励磁突入現象の弁別と、タンク強度と協調のとれる事故検出感度の確保が課題である。この課題を解決する際の1000kV変圧器の500kV変圧器と比較した保護上の特徴は次のとおりである。

(1) 定格、構造の比較

1000kV変圧器は500kV変圧器に比べて定格容量2倍、定格電圧2倍、%インピーダンスは同じであり、構造は輸送限界から1相当り2タンク構造、タンク容量2倍（1タンク当りの容量は同じ）である。

表2 1000kV変圧器と500kV変圧器の比較
Table.2 Imbalance of transformer on 1000kV and 500kV

	1000kV変圧器	500kV変圧器
定格電圧	$\frac{1050}{\sqrt{3}} / \frac{525}{\sqrt{3}} / 147\text{kV}$	$\frac{525}{\sqrt{3}} / \frac{275}{\sqrt{3}} / 66\text{kV}$
定格容量	$\frac{3000}{3} / \frac{3000}{3} / \frac{1200}{3} \text{ MVA}$	$\frac{1500}{3} / \frac{1500}{3} / \frac{500}{3} \text{ MVA}$
構造	1相当り2タンク構造	1相当り1タンク構造

(2) 事故検出感度

検出限界における事故点アークエネルギー／タンク容量は同等であるが、急速な故障拡大を考えると、ダクトと結合した隣タンクへの圧力拡散の影響があらわれないので厳しくなり、高感度化が必要である。

(3) 励磁突入電流分布の特徴

図9 励磁突入電流の分布
Fig.9 Transformer inrush current

- ・一次端子、二次端子及び中性点端子から流入する電流の和は零である。
- ・直列・分路・三次巻線の電流は2タンクにはほぼ均等に分流する。
- ・3次△回路を還流する。

(4) 事故様相

- ・1次、2次回路は巻線の層間短絡か地絡のみで相間の短絡はない。

図10に1000kV変圧器構成とCT配置を示す。

図10 1000kV変圧器構成とCT配置
Fig.10 Current transformers allocation of 1000kV transformer.

＜4.2＞ 主変圧器直列・分路、三次巻線部短絡保護

巻線内部短絡事故時は2個のタンク間電流が不平衡になり常時の負荷時や励磁突入現象時はほぼ平衡となる特徴を活用し、直列巻線S、分路巻線C、3次巻線T個別のタンク間電流比較方式（61S、62C、61T）とする。

61S、61C、61Tによる巻線短絡事故検出特性の解析例を図11に示す。図11中記号●■▲の事故は、図12に示した

図11 巻線短絡事故検出特性
Fig.11 Fault current detection characteristics under short-circuit fault of winding.

ように第1事故で飽和圧力に達した後一次端子地絡事故（アークエネルギー最大の事故）に進展した場合に、進展後4サイクル未満（事故除去に必要な時間）でタンク強度限界に達するものである。図11から61S、61C及び61Tは

図12 進展事故時のタンク内圧上昇特性
Fig. 12 Internal pressure-rise characteristics of 1000kV transformer tank under evolving fault.

いずれも進展前の事故そのものを検出できるので、このような進展事故を想定した場合でもタンク強度限界に達する前に保護動作を完了できる。

なお、鉄心材料特性及び変圧器鉄心の製作ばらつき等によって変圧器停止時に2個のタンクの変圧器鉄心残留磁束密度に若干の差を生じ、次に遮断器を投入するときにタンク間に不平衡励磁突入電流を生ずると考えられる。この不平衡励磁突入電流で誤動作しないよう、図11に示すように最小動作電流を0.2 puに設定する必要がある。

＜4.3＞ 地絡保護（一次、二次端子及び巻線部）

励磁突入現象を含み健全時の各相の一次端子、二次端子及び中性点端子から流入する電流の和は常に零であり、地絡時のみ差動電流が生じることから一次、二次、中性点間の電流差動方式（87G）とした。

＜4.4＞ 三次端子保護

励磁電流が三次△回路を還流すること、端子部の短絡事故は相間の短絡であることに着目し、△回路を3分割して電流差動リレー（87T）で保護する。

5. 系統後備保護⁽³⁾

＜5.1＞ 現行系統後備保護と問題点

基幹系統の系統後備保護は、電気所の直流電源喪失、伝送路不良が発生しても確実な事故除去を確保するため、方向距離リレーによるリモート保護が基本である。現在の後備保護は、送電線のルート遮断を防止するため、母線分離リレーにより事故点側の母線を分離した後、リモート後備保護により事故点に近い点から多段限時トリップして最小限の停電範囲に留める方式を採用している。このためリモ

ート後備保護リレーは母線分離リレーとの時間協調が必要であり、事故除去時間の高速化には限界があった。また、方向距離リレーは分流効果の影響を受け、さらに長距離線路と短距離線路が隣接する系統では、図13に示す様に長距離線路の距離リレー第2段が短距離線路の対向母線事故で動作する整定となるなど、事故区間の弁別能力に限界がある。このため系統によっては事故時に不要な遮断を避けるため更に協調時間を長くする（ $T_2 \rightarrow T_3$ ）が必要あり、事故除去時間も遅延するという問題がある。

図13 現行方式の問題点
Fig13. Problem of current protection scheme

＜5.2＞ 方式面の対策

1000kV系統の後備保護リレーは、停電範囲の局限と事故除去の高速化を目的として、実績のあるリモート後備保護を基本に、事故の広域区間識別とリモート後備保護の高速化制御を付加する。広域区間識別機能は主保護機能喪失時でも機能するよう後備保護である送電線や変圧器および母線連絡保護用方向距離リレーの動作情報を組み合わせ、事故区間の弁別と遮断すべき端子の選択を行うものである。

また、リモート後備保護の高速化制御は、遮断すべき点のリモート後備保護に対して、伝送系を用いて高速化補正を行うものである。

この方式の事故区間弁別と高速化制御する端子の選択は次の通りである。

(i) 送電線後備保護の距離リレー第1段が動作した時はその送電線の事故と判定し、自端子を高速遮断するとともに、その送電線の対向端子の後備保護を転送により高速化制御する。

(ii) 母線分離リレーの第1段（母線又は母線至近端前方事故のみ検出）が動作し、かつ、その母線に接続される送電線及び変圧器後備保護の距離リレー第1段がすべて不動作時は母線事故と判定し、その母線に接続される送電線および変圧器の対向端子の後備保護を転送により高速化制御する。

図14にこの方式の概要を示す。図は母線事故が発生し、母線保護リレーが不動作の例である。このときB電気所では、母線事故と識別し、この事故母線に接続される送電線の対向端子のリモート後備保護の動作時間を高速化する指令を送信する。この指令を受信した端子では、リモート後備保護の動作時間を T_3 から T_1 時限へと短縮する。

この方式の採用により停電範囲の局限化（ルート断防止）

とりモート後備保護による事故除去時間的高速化が図れる。

図14 母線事故時の応動例

Fig14. Example of relay operation on busbar fault

6. 高速接地式再閉路⁽⁴⁾

＜6.1＞高速多相再閉路⁽⁵⁾

1000 kV 系統は、系統連系の中樞を成すものであり、送電線ルート断事故（2回線断事故）回避、および系統安定度確保のため高速多相再閉路方式の採用が不可欠である。

しかしながら、1000 kV 送電線においては、事故相遮断後自回線の健全相や同一鉄塔の隣回線からの静電誘導により2次アークの消弧が遅れ、風速などの周囲条件によっては消弧しない場合があって、この2次アーク電流の消滅時間を大幅に短縮する技術が必要である。

＜6.2＞2次アーク消弧方法と高速接地式再閉路⁽⁶⁾

2次アークを消弧させる有力な方法としては、静電結合による2次アーク電流をリアクトル電流で補償する零相補償不平衡分路リアクトル方式と、事故相を接地する高速接地方式がある。前者は事故様相によって消弧時間が変わり、とくに2回線に跨がる多重事故で消弧時間が長くなる傾向を示す。これに対し、後者は図15に示すように事故遮断後、開放された事故相両端を高速接地開閉器（HSGS）で接地することにより2次アークを消弧し、その後速やかにHSGSを開放する方式で事故様相によらず常に安定した効果があるので、この方式を選択した。

再閉路方式は多重事故や頻発事故でも極力連系の確保が要求されるため各相独立に構成し、連系が維持されている間は遮断器の責務の許す範囲で再閉路を実施するようにした。

図15 高速接地方式

Fig15. High-speed system grounding (scheme) during autoreclosing

図16 HSGS 制御条件

Fig16. Basic HSGS protection scheme

＜6.3＞信頼度向上策

高速接地式再閉路式において、

①事故発生→②事故相遮断器開放→③事故相HSGS投入（→④2次アーク消弧）→⑤事故相HSGS開放→⑥事故相遮断器投入（再閉路）という一連の動作を高速かつ高信頼度を実施する必要がある。

高速接地式再閉路において、万一HSGSが投入されたまま線路の遮断器が投入されると事故の拡大を招くおそれがある。このため、事故時の遮断器開放確認（HSGSの投入条件）とHSGSの開放確認（線路遮断器の投入条件）は図16に示すように電気的および機械的に確認できる条件のアンド構成とした。さらに、HSGSの開放確認には開放後の健全相からの誘導電圧が大きくなるため、この条件を付加した。現在275 kV 系統においても再閉路条件を同一に構成した装置で実証試験を実施しており良好な効果が得られている。

7. 持続性交流過電圧保護

＜7.1＞過電圧発生のメカニズムと対策

1000 kV 送電線は、1ルートあたり10 GWを超える大電力を最長で二百数十 kmにおよぶ長距離を送電するため、万々が何らかの要因でルート断になると、発電機が急激に加速する。これに伴って、500 kV 系統が事故波及拡大防止のため脱調分離されると、1000 kV 送電線だけが無負荷電源系に接続された単独系統を構成する場合がある。

このような状況になると、発電機加速による周波数上昇と1000 kV 送電線の充電容量によるフェランチ効果が相まって持続性の交流過電圧が発生し、200～300 ms 程度で避雷器が熱耐量を超えて破壊に至る。特に、過電圧によって送電線のがいしがフラッシュオーバーし、地絡事故に至った場合には健全相の電圧上昇が一層厳しくなり、80 ms 程度で破壊に至る。したがって、高性能避雷器の適正配置により開閉サージや地絡事故サージを抑制し、系統全体の絶縁レベル低減している1000 kV 系統においては、この避雷器破損が即、系統復旧操作不能につながるので、避雷器破損までに過電圧を解消する保護対策が必要になる。

このため過電圧を高速に検出し無負荷1000 kV 送電線を遮断することにより過電圧を解消し、避雷器の破壊を防止する。具体的には図17に示すように線路開放端子で過電圧を検出した場合、対向端子の遮断器を転送により遮断する。この過電圧時の処理時間は図18に示す避雷器の電流一時間特性の避雷器の耐量時間で制限され、電圧が1.4 pu 以上では対向端子の遮断器の動作時間を含めて80 ms 以下の高速処理が必要となる。

図17 持続性交流過電圧保護
Fig17. Over-voltage protection

図18 避雷器の電流-時間特性
Fig18. I versus t characteristics of arrester

<7.2> 過電圧検出アルゴリズム

避雷器の消費エネルギーは、 $\int (i \cdot v) dt$ で求まるが、尖頭波状の電流 i が流れるときの電圧 v はピーク値付近のほぼ一定の値をもつ。

そこで、

- ① 電圧×電流の積分 : $W = \int (i \cdot v) dt$
- ② 電流の積分 : $W = K \int |i| dt$
- ③ 電圧(ピーク値)×電流の積分 : $W = V_{max} \cdot \int |i| dt$

の3方式により避雷器のV-I特性を模擬したEMTPによる電圧・電流波形についてデジタルリレー内のアナログフィルタ、デジタルフィルタを加味して熱エネルギーのシミュレーションを行った。アナログフィルタは尖頭波形より基本波分を抽出するローパスフィルタとし、サンプリング周波数は4800Hzとした。

その結果、表3及び図19に示すように、各方式とも精度面で顕著な差異がないので、ハード構成のシンプルな②の電流面積演算方式を採用することとした。

表3 各方式の比較
Table 3. Consideration of each method

案	方 法	比 較 検 討
①	$\int (i \cdot v) dt$	<ul style="list-style-type: none"> 広範囲の過電圧に対し、時間誤差はほぼ一定(+1~2%)である。 PDの特性に依存する。
②	$K \int i dt$ (K: 固定電圧値) シミュレーションでは、 K=1250kVとした。	<ul style="list-style-type: none"> K値付近の過電圧での時間精度はよい。 K値から離れるにつれ誤差は増加するが最大10%程度の誤差であり、無視可能。 電圧を導入しないので、PDの特性には依存しない。
③	$V_{max} \cdot \int i dt$ (V_{max} : アレスタのピーク電圧)	<ul style="list-style-type: none"> マイナス方向(アレスタ耐量からは安全側)の時間誤差傾向である。 電圧最大を検出するためPDの特性には直接依存しない。

時間誤差 = (実際の耐量時間 - シミュレーションによる耐量時間) / 実際の耐量時間

図19 各方式のシミュレーション結果
Fig19. Result of computer simulation

避雷器電流は図18に示すように0.05~100 A程度の広い範囲を検出する必要があるが、変流器は試作検証の結果変流比100 A / 1 Aで1次電流0.1 Aまで誤差10%以下を実現できる見通しを得た。

図20に検出アルゴリズムを示す。この避雷器の消費エネルギー検出は熱耐量曲線に対応した反限時特性を基本とし、特に高速動作が要求される大電流域は定限時特性とした。

フェイルセーフは避雷器電圧の上昇で検出するが、線路開放端子のフラッシュオーバーで地絡事故に至った場合、事故電流の過渡直流分により、直流偏移した電圧となるため、ピーク値検出とした。

過電流判定構成図

過電圧判定構成図

図20 過電圧検出アルゴリズム
Fig20. Algorithm of overvoltage protection

8. あとがき

1000 kV 系統保護方式の基本検討により、実用化の見通しが得られた。今後は、実用方式の詳細な検討と保護装置試作による検証を段階的に進め、着実に実用化をはかっていく予定である。

最後になったが、今回の検討に際して貴重な示唆と助言をいただいた東京電力(株)、(株)東芝、(株)日立製作所及び三菱電機(株)の関係者の方々に感謝の意を表したい。

(平成5年12月3日受付)

文 献

- (1) 前田, 他: 「1000 kV 母線保護方式の検討」 電気学会 H5 電力エネルギー部門大会 359
 - (2) 前田, 他: 「1000 kV 変圧器保護方式の検討」 電気学会 H5 全国大会 1508
 - (3) 大浦, 他: 「基幹系統の高性能後備保護方式の開発」 電気学会, H5 全国大会 1504
 - (4) 前田, 他: 「高速接地消弧式再閉路方式の開発」 電気学会, 電力技術研究会, 平成3年10月
 - (5) N. N. BELYAKOV, et al. Application of Single-Phase Autoreclosing in a Complex EHV Network Containing 1200kV Transmission Lines (CIGRE 1990, Rep. 34-207)
 - (6) 関根, 他: 特集「UHV 交流送電 2. 系統設計」 電気学会誌 昭57-11
- 鈴木 守 (正員)

昭和24年5月12日生。49年慶應義塾大学院工学科修士課程終了。同年4月東京電力(株)入社。同社系統運用部制御技術課において、給電自動化システム、電力系統保護制御システムの開発に従事。現在、中央給電指令所副所長。平成3年電気学会論文賞受賞。

松田 高幸 (正員)

18年1月1日生。46年3月東京電機大学電機工学科卒業。37年4月東京電力(株)入社。当社系統運用部において、系統保護制御システムの開発に従事。現在同部制御技術課課長

稲垣恵造 (正員)

昭和20年2月18日生。38年3月山口県立宇部工業高等学校卒業。同年4月(株)日立製作所入社。同社日立研究所にて主として変圧器の電磁気回路解析研究に従事。平成4年2月より国分工場に勤務し、UHV変圧器関係の開発を担当、現在に至る。IEEE会員

佐々木宏 (正員)

昭和15年1月2日生。33年3月秋田県立横手工業高等学校電気科卒。37年1月(株)日立製作所入社。同社日立研究所にて電力系統の保護制御関係の研究開発に従事。62年5月より同社国分工場に勤務、現在に至る。

白井正司 (非会員)

昭和26年4月18日生。49年3月岩手大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機入社。現在、同制御製作所に勤務。主として、デジタル形保護継電器の開発設計に従事。

堀 政夫 (正員)

昭和20年12月18日生。43年熊本大学工学部電気工学科卒業。同年(株)東芝に入社。電力技術部(現電力系統技術部)に勤務、現在に至る。主として、電力系統の保護制御装置の開発に従事。