並列静電容量による電力系統短絡電流の変歪

正 員 萩 森 英 一 (東京工業大学)

Short-circuit current distortions in power systems with high parallel capacitances
Eiichi Haginomori, Member (Tokyo Institute of Technology)

In recent power systems in Japan, in some special districts, extremely high parallel capacitances have been connected, such as high capacity shunt capacitor banks for the purpose of voltage stability enhancement and EHV cables transmitting powers to large cities. As for short-circuit breaking currents for circuit-breakers, till now a days, only power frequency and dc components, both of which are supplied from the power sources, have been considered. Regarding the transient components due to the discharges of the parallel capacitances, because of relatively high frequencies and high damping rates, little attention has been paid. But due to the increase of the parallel capacitance values resulting higher amplitude and lower frequencies of the transient components, and also introducing facilities with low loss rates, the effect of the transient components on circuit-breakers' performances may not be possible to be disregarded.

Introducing a model power system covering the conditions of today and near future, and applying EMTF, with reviewing the simulation accuracy comparing with field measuring data, some calculations have been performed. The results show the possibilities of certain effect on circuit-breaker performances in the, especially, thermal mode of quenching phenomena such as breakings of short-line fault currents.

キーワード：電流変歪，短絡電流，高調波，電流零期間

1. まえがき

近年、わが国の電力系統は、電圧安定度向上のための調相用コンデンサバンクの設置、あるいは都市部への大容量送電のための超高压ケーブルの増設などにより、並列キャパシタンスの充電容量が著しく増加してきている。

従来系統の短絡保護で、遮断器の短絡・遮断電流に関しては、一般には電源から供給される商用周波成分と過渡的な直流分のみを考慮し、キャパシタンスの放電による過渡成分は高周波で振幅も比較的小さく、短絡直後に減衰してしまうため考慮せず、また規格にも取り入れられていない。しかし充電容量の大幅な増加にともなって、系統内の地点によってはこの高周波過渡成分の振幅が増し、さらに容量増加による周波数の低下と損失の小さい機器・設備の導入により減衰が小さくなる傾向にあり、一方でリレーや遮断器の高速化により短絡継続期間が短くなり、遮断器の遮断性能に影響を与える短絡電流消弧瞬時の高周波過渡成分が無視できなくなっている可能性がある。

遮断機の遮断性能は、例えば近距離線路故障遮断のよう

に、条件によっては遮断電流の波高値よりはむしろ遮断する電流零点での電流変化率（傾斜）で決定される場合⁽¹⁾があり、高周波過渡成分は位相によってはこの傾斜を増加させるため、十分注意深く検討する必要がある。

本論文では今日・近未来の大容量電力系統を想定したモデルで、系統解析に広範囲に使われているEMTPにより、短絡電流への過渡成分の重畳の様相を解析し、遮断性能への影響を検討した。なお、ここで述べるのと類似の現象が我が国のUHV(1100kV)送電系統の計画段階で明らかになり報告されている。^{(3)・(6)} この現象は広範囲の架空送電線のキャパシタンスに起因していて、線路の減衰の特に少ないUHV特有のものと考えられ、しかも線路、変圧器、負荷回路の減衰の実際の値を考慮した場合は電流変化率の増加はそれほど大きくはない。一方ここで述べるものはコンデンサバンクやケーブル等の狭い範囲の大容量キャパシタンスに起因したもので、UHVの場合と同レベルに減衰を勘案しても減衰は少なく、一層苛酷な条件になる可能性があり、さらに今日の問題でもある。他方海外でも最近コンデンサバンクの近傍での短絡遮断の特異現象に関しての

図1 基本原理回路と短絡電流波形

Fig. 1. Basic circuit and short-circuit currents

$R_s = 0.05\Omega$ $L_s = 5.3\text{ mH}$ $R_1 = 0.03\Omega$
 $L_1 = 8.95\text{ mH}$ $R_2 = 0.03\Omega$ $L_2 = 0$
 $R = 0.60\Omega$ $L = 26.3\text{ mH}$ $C = 33.0\mu\text{F}$

報告⁽²⁾があるが、わが国ではコンデンサ回路の直列リアクトル、および非常に低損失の変圧器、架空線、低損失超高压ケーブルの採用等、諸外国と異なった条件もあり、わが国系統回路に則した独自の検討が必要である。

2. 基本現象

まず基本原理を説明する。最も単純化し、変圧器の2次側に換算した等価回路で表した単相モデル回路とそこでの短絡電流を図1に示す。これは例えば調相用コンデンサが変圧器の3次回路に接続されている変電所の2次側母線の短絡電流を計算するもので、 L_s 、 R_s は電源を見込んだ短絡インピーダンス、 C 、 L 、 R は変圧器3次側インピーダンスを含んだコンデンサの回路である。また L_1 、 R_1 、 L_2 、 R_2 はそれぞれ変圧器の1次、2次のインダクタンスと抵抗である。3巻線変圧器をT字型等価回路で表すと、2次のインダクタンスの値は一般に小さく、ほぼ零とみなすことができる。この図で電源電圧が波高値のときに2次側を短絡すると、短絡電流 i は通常短絡計算で考える1次側の交流電源から供給される i_1 と、コンデンサの電荷の放電による過渡的な成分 i_c の和になる。図1で、550kV/300kVの変電所で変圧器容量合計が5000MVA程度、コンデンサバンク容量合計が800MVA程度と想定し、単相回路のパラメータを適宜図中に示すように定めて、短絡電流波形を

図2 解析に適用したモデル電力系統

Fig. 2. Model power system applied to the calculations

計算したものを(b)に示す。コンデンサバンクの放電電流の周波数は150Hz程度になり、振幅はこの図のように最高の場合でも商用周波分の15%程度で50Hzの基本波成分に重畳する。遮断器性能への影響として、アークエネルギーの蓄積の面では、波形が増減するので特に考慮する必要はないと考えられる。しかし遮断器が電流を遮断する電流零点において、例えば図のA点のように商用周波分 i_1 とコンデンサ放電による i_c の位相によっては、電流傾斜は、この例は極端な例を示しているが、40%強増加している。コンデンサの放電の振動の減衰が大きくて短絡期間中(リレー時間と遮断時間の和)に減衰してしまえば問題なく、減衰の影響が大きいので、注意深い評価が必要である。ただ、(c)図はB点で一旦消弧後数百 μs で再発弧した場合の波形で、コンデンサが再充電、再放電するため、遮断すべき次の電流零点Cでは、減衰はほとんど期待できない。ただしこのようなチャンスは後述のように相当に小さいと考えられる。

3. 解析対象のモデル回路構成

今日および近い将来のわが国電力系統をカバーし、単純な構成ほど各周波数成分の相互干渉が少なく、キャパシタンス放電の影響も大きく現れやすいことを考慮し、図2のモデル系統を考える。解析結果に示すように、コンデンサバンクの放電の周波数は約150Hz、ケーブルの放電は約300Hzであり、前述のようにこれら成分の減衰が重要であるので、解析に使用する回路の各素子の特に減衰に関する値は、この点に特に留意して以下のように求めた。なお、容量・規模は今日の最大規模のものを想定して定め、系統電圧は解析のベースであり遮断器性能の基準である最高電圧で表示している。

基準周波数：

表皮効果等減衰に関するものは、A変電所および550kV系統は150Hz、300kV側は上記のケーブルの放電が主対象であり300Hzでの値を適用した。

架空送電線：

上記周波数帯での減衰に関して最も実績のある⁽³⁾EM

TPのLINE CONSTANTSのねん架線路として求めた。大容量線路の代表として550kVは810mm² 4導体、300kVは610mm² 4導体の線路として求めた。

ケーブル：

現象が比較的遅いものを対象にしているため、EMTPのCABLE CONSTANTSのクロスボンドモデルを使用し、EMTPでは無視している、300Hzにおける $\tan\delta$ 相当の抵抗を各接続点の心線とシースの間に接続した。いずれも今日の大容量のものとして、2000mm²のOF(25kmのもの)およびCV(18km)タイプのものがコンクリート隧道内に設置されているものとして定数を求めた。⁽⁴⁾

コンデンサバンク：

低損失コンデンサの $\tan\delta$ として0.05%をとり、150Hzでの相当する抵抗をキャパシタンスと並列に接続した。6%直列リアクトルは50Hzにおける損失をバンク容量の0.05%とし、そのうちの巻線損60%はこの周波数範囲では不変として50Hzでの値の直列抵抗を、鉄損25%は、(周波数×磁束)の2乗、すなわち電圧の2乗に比例すると同様50Hzでの値の並列抵抗を、漂遊損15%は電流の2乗と周波数の1.5乗に比例すると同様50Hzでの値の直列抵抗を接続した。また定格電流の200%以上でB-Iカーブ上で傾斜が1/6になる鉄心飽和特性を導入した。

変圧器：

数百Hz以下の周波数での現象を対象にしているため、モデルとして変圧器本来の電磁作用に基づくEMTPのTRANSFORMERが十分有効と考え適用した。A変電所のもの(525/287.5/63kV)は、50Hzにおいて、鉄損を0.03%、一・二次間の負荷損0.15%のうちの85%を巻線の銅損、15%を漂遊損とし、前述リアクトル同様漂遊損に相当する直列抵抗のみを周波数の1.5乗に比例させて増大し、それぞれ対応の抵抗を接続した。単巻変圧器を対象にしたので直列抵抗は高圧部分巻線と共通部分巻線に二分、

電圧換算して挿入した。三次巻線は、同様に漂遊損分を増して、 L/R (H/ Ω)が70msになる直列抵抗を挿入した。

なお、巻線のインピーダンスは代表的な値として、一次が16%、二次が0 (実際はEMTPの都合から小さい正数) 三次が20%とした。

B変電所のもの(287.5/154/22kV)は、鉄損を0.05%、負荷損を0.3%とし、同様に算出した。インピーダンスは一次、二次、三次がそれぞれ12、0、40%とした。

鉄心の飽和については、今回の解析で変圧器が飽和領域に入ることはないので無視した。

550kV遠方系統

文献⁽⁵⁾に示したように遮断現象のような過渡現象解析で、送電線の一区間先の系統は集中定数の回路に縮約しても十分に等価性があるので、ここでも採用した。ただ系統の短絡インピーダンスは主に架空送電線で決まるとし、遠方系統を見込んだ L/R は150Hzで算出した架空線の値に一致させた。

負荷回路

文献⁽⁵⁾に示したように、高電圧側から見込んだ負荷回路は商用周波数以外の現象の減衰には必ずしも効果がないこと、軽負荷の条件もあることから今回は接続していない。なお、過大なフェラランチ現象を抑制するために、B変電所には、並列リアクトルを接続した。

なお、図3は、類似の回路現象として22kV、20MVAのコンデンサバンク、154kV、80MVAコンデンサバンク、275kV、約24kmのケーブルの充電時の突入電流波形をここで使用した基準で回路をモデル化して解析した結果と現地の測定結果を比較したものである。現地の系統条件は必ずしも詳細には得られてはいないが、両者の特に減衰の様子はよく合っている。充電時の突入電流にはキャパシタンスの近くでの短絡電流に比べて、はるかに広範囲の回路が影響を及ぼすことを考慮すれば、ここでのモデル化の精度もかなりの程度は裏付けられたと考える。

4. 解析結果

〈4・1〉 解析条件・結果 表1に解析の系統条件、解析で得られた短絡電流の消弧時点の波形のフーリエ級数展開

(EMTPで自動的に実施可能)で求めた高調波含有率等を示す。短絡・故障点のF1は300kV母線での短絡で、他に線路・リアクトル・変圧器があった場合のその回路の遮断器の至近端短絡に相当し、一般に全短絡遮断と称するもので最大の故障電流が生じる。F2は高調波が含まれたときに遮断器の遮断性能に最も影響の大きい近距離線路故障で線路用遮断器で遮断するもの、F3はケーブル系統の中心部でのF1と同様の全短絡遮断、またF4は変圧器を介して168kV側での全短絡遮断に相当する。図4は代表的な短絡電流の波形である。ケースNo.10については、参考と

図3 キャパシタンス突入電流波形、解析と現地測定比較

Fig. 3. Calculated and measured capacitance inrush currents

図4 解析で得られた短絡電流波形の例
Fig. 4. Short-circuit current wave-forms calculated

表1 系統構成と短絡電流高調波成分

Table 1. Power system parameters and Harmonics in short-circuit currents

ケース Nos.	短絡点	故障 三・相	コンデンサバンク GVA	ケーブル	高調波 k_i %						*総合 増加率%
					2次	3	4	5	6	7	
10	F 1	三	.6G/.6G	全	1.1	11.2	1.3	9.2	7.7	3.3	77
101	F 1	単	.6G/.6G	全	1.5	4.2	1.2	6.1	1.0	0.	34
12	F 1	三	.6G/.6G	ナシ	0.5	10.0	1.6	0.7	0.5	0.4	31
121.	F 1	単	.6G/.6G	ナシ	1.9	7.3	0.9	0.6	0.3	0.2	23
13	F 1	三	ナシ	全	0.5	1.9	2.3	9.1	6.8	2.7	65
131	F 1	単	ナシ	全	0.2	0.5	1.5	6.7	1.3	0.8	35
14	F 1	三	.4G/.4G	全	1.8	6.9	2.6	7.8	8.2	3.7	72
141	F 1	単	.4G/.4G	全	0.7	6.3	1.9	4.8	1.0	0.7	32
20	F 2	三	.6G/.6G	全	0.4	5.1	1.6	10.4	0.8	0.4	55
201	F 2	単	.6G/.6G	全	1.1	4.9	2.0	2.0	0.5	0.3	20
21	F 2	三	.6G/.6G	ナシ	0.8	3.6	0.9	0.5	0.3	0.2	12
22	F 2	三	ナシ	全	0.4	0.5	0.9	11.1	0.8	0.4	56
23	F 2	三	.4G/.6G	全	1.2	9.5	2.7	9.2	0.7	0.5	56
231	F 2	単	.4G/.6G	全	0.5	4.7	1.0	2.7	1.0	0.7	21
30	F 3	三	.6G/.6G	全	0.6	7.4	1.0	0.6	0.4	0.3	23
40	F 4	三	.6G/.6G	全	0.3	0.5	4.1	1.1	0.6	0.4	18

*参考値、本文(2)式により算出

してコンデンサバンクとケーブルの電圧も示した。前者の電圧波形の速い周波数の成分は直列リアクトルの非直線に起因したものであり、電流にはほとんど影響していない。また、図5は、近距離線路故障遮断の電流と過渡回復電圧を従来実施されている過渡成分なしの電流を遮断するときのものと今回の高周波分を含むケース No. 20の条件で遮断

したものとの比較である。

解析結果は、：

(1) 高周波分の減衰・大きさ ケースNo.10 のコンデンサおよびケーブルの電圧の減衰波形から明らかであるが、高周波分の減衰の時定数は数10msであり、一般に今日の遮断器の消弧時である短絡から50ms頃にもかなりの大きさの

高周波分は残留する。

(2) 高周波成分 系統のパラメータ、構成、解析のフーリエ展開の結果から、コンデンサバンクの放電によるものは3次前後の高調波として、ケーブルによるものは5次前後の高調波として発生していることがわかる。それぞれが複数の周波数の波形の合成であり、タイミングによっては干渉して見掛け高調波が少なくなることもある。表1の結果は極端に高調波成分が少なくなるものは省き、また三相故障では成分が最大の相のものを、単相故障では電圧波高値で短絡させ成分が最大になるものを示した。単相故障でもここでのものは線路が比較的短く零相回路の抵抗が小さいので、減衰はそれほど大きくない。

(3) フーリエ級数展開 後述の効率的な扱いのため、電流波形を前述のようにフーリエ級数展開し高周波成分を高調波として求めた。今日の高速度のリレー時間10~20ms、遮断器遮断時間30~40msを考慮し、短絡時から50±10msの間の波形を展開した。なお、7次より上については、含有率が十分に小さいこと、解析内容も精度が期待できないこと、現実にも減衰が大きく、まず存在しないと予想されることから、今回は省いている。

(4) 故障点・各種パラメータ キャパシタンスが大きいほど高周波成分も多くなる方向であることは明らかであり、さらにパラメータのわずかな変化で結果が大きく変わり、苛酷な条件を逃してしまうことのないように、表1のようにパラメータを変えながら解析した。

〈4・2〉 高周波成分の評価 故障点F3の場合はケーブルの放電電流が1kHz以上の高周波になり減衰が速いのでコンデンサバンクの放電だけが残る、しかも線路のインピーダンスを介しての放電なので特に過酷になることはない。またF4の場合は、実在の最大クラスの変圧器の場合でもかなりのインピーダンスを介しての放電になり、やはり特に過酷になることはない。ゆえにここではF1、F2での短絡について検討する。

最近の大容量遮断器の代名詞にもなっているSF₆ガス遮断器では、前述のように近距離線路故障遮断のように電流零近傍の熱現象が支配的な条件では、遮断現象は主に零点前の電流傾斜に支配される。電流傾斜の増加分の評価方法として、本来は実状に即した非常に多くの系統条件で解析し、短絡からある時間（例えば50ms）後の零点の電流傾斜を求めて統計的に扱うことが考えられるが、効率的でなく、また本質を見逃す可能性もある。ここではなるべく効率的に実際の最高値をカバーする方法を求めてみる。

高調波を含む電流を遮断する場合*i*次の含有率が*k_i*とすると、これによる電流傾斜の増加は、もし位相が一致した場合、最高で(*i*・*k_i*)になり、さらに高調波全体での増分の最高値は、

$$\sum (i \cdot k_i) \dots\dots\dots (1)$$
 になる。しかし、この値は基本波および各次数の高調波全ての位相が遮断電流零点で正弦波の0度に一致する場合のもので、あまりにも低確率の現象を取り上げることになっ

図5 近距離線路故障遮断、電流TRV比較

Fig. 5. Breaking currents and TRVs in SLF breakings

て実用的でない。やや厳密さには欠けるが、誤差を含む複数の数値を合計したものの誤差を求める場合に、各誤差の平方の和の平方根を採用する方法がよくとられる。これを適用すれば、各高調波による電流傾斜の増加の総合的な増加分は、

$$(\sum (i \cdot k_i)^2)^{0.5} \dots\dots\dots (2)$$

の程度となる。表1にはこの式で計算した電流傾斜の増加の割合(%)も参考として示した。

図5は高調波の有無による差が特別に顕著な例であり、高調波による電流傾斜の増加分は約70%である。これは表1のケースNo.20（表の数値は短絡後50msの値）の10ms前で消弧されたもので、この場合の消弧時刻、すなわち短絡から40msでの高調波を求め、(1)式で求めた増加率は95%、(2)式では61%となる。図5は意図的に増加分の特に大きいケースを取り上げたものでなお(2)式による値を僅か上回る程度であり、一般にはここでの単純な回路構成よりはさらに回路素子が多くて複数の周波数の振動が重畳し、値が分散することも考慮すれば、(2)式による総合的な増加分はほぼ妥当な値を与えるものと考えられる。さらに、(2)式の値は高調波の影響が大きい回路条件で、等価的な一つの高調波の位相が一致した場合の増加分を示していて、なおも低確率である。飛躍した例であるがIEC規格の雷過電圧と商用周波電圧との重畳の試験では商用周波電圧の70%の値を採用しており、ここでも(2)式の値の70%を遮断試験での値として採用することも考えられる。また、電流傾斜の影響が特に大きいのは近距離線路故障であり、従来から割り切りで1線地絡故障のみを対象にしているので、ここでも減衰の大きい近距離線路故障の1線地絡の値のみを採用するのも一法であろう。さらに一つの電流零点で消弧に失敗しても、有効消弧期間が長い遮断器では次の零点での消弧の可能性もあり、このときは高調波の位相が楽な方にずれる可能性もある。以上のように具体的に仕様や規格の値とするにはなおも多くの議論が必要である。

図1(c)に示すような再発弧、および1/2サイクル後の

再消弧は遮断器の開極のタイミングによっては起こり得る現象である。しかし、1/2サイクル後に大きな傾斜が現れるのは、最初の消弧から再発弧までの時間、その間のキャパシタンスの充電の立上がり、次の零点までの間の放電の周期などさらにいくつかの条件が重なった場合であり、現実の回路での可能性等になお十分な検討が必要と思われるので今回は可能性を示すのみとする。

なお、遮断性能の検証方法の面では、電流波形の波高値付近については高調波の増減が重畳するので特に考慮する必要はなく、電流注入合成遮断試験で高電圧回路の調整のみで条件を満たすことができ、原理的には特に問題はない。

5. まとめ

今日の大容量電力系統で大容量コンデンサバンクおよび/または大容量のケーブルシステムの近傍での短絡故障の際、回路条件によっては短絡電流にキャパシタンスの放電による高周波成分が重畳し、遮断器の消弧しようとする電流零点で電流傾斜が大きくなる可能性のあることを示した。このような回路には遮断性能の上回った遮断器を適用する必要がある。ただ、このような条件になるのは地点としても限られているので、遮断器の仕様としても個別に検討するのが賢明であろう。また、特に現象の基準になる回路の減衰については従来の電力系統の解析でも取り上げられたことが少なく、例えば図3に示したようなコンデンサバンク・ケーブルの充電時の電流波形の収集等のフィールドのデータでパラメータを確立してゆくことが望まれる。

解析にあたり最近の電力系統のパラメータに関して東京電力株式会社、中部電力株式会社より、またコンデンサバンクに関して日新電機株式会社よりそれぞれ有益な資料をご提供いただいたことに厚く御礼申し上げる次第である。

(平成6年5月28日受付、同年7月25日再受付)

文 献

- (1) E. Haginomor, et al: "Performance of Circuit-Breakers related to High Rate of Rise of TRV in High Power, High-Density Networks" IEEE Trans. PAS 104 No. 8, August 1985, pp2267-2273
- (2) L. van der Sluis, A. L. J. Janssen: "Clearing Faults near Shunt Capacitor Banks" IEEE 90 WM 188-3 PWRD
- (3) 雨谷、寺沢、西脇、下村、徳山: 「EMTPによる架空線路の損失模擬」平成5年電学電力・エネルギー部大No. 405
- (4) 電学技報(Ⅱ部) 第366号「ケーブル系統におけるサージ現象と対策」
- (5) 萩森、吉村、小林、金子、横田、石川: 「超高圧放射状系統の故障遮断条件」電学論B, 113巻4号(平5-4)
- (6) 渡辺、山形、小林、他: 「1000kV遮断器の所要責務(その1~3)」平成5年電学電力・エネルギー部大No. 54~56

萩森 英一 (正員) 1940年1月2日生れ。62年3月東京工業大学電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。主として空気遮断器、SF₆ガス遮断器の開発設計に従事。76年~91年IEC SC17A-WG10メンバーとしてIEC遮断試験規格立案に従事。91年10月より東京工業大学電気・電子工学科、(東京電力)寄附講座客員教授。IEEE会員。工博。