UDC 621.316.57.027.3: 621.311.6.015.3

論 文

59-B 40

電圧源を再利用する 2 電源方式

4 パラメータ過渡回復電圧発生回路

正 員 高 橋

功 (日立製作所)

1. ま え が き

最近の大容量電力用しゃ断器の進歩はめざましく、しゃ断部の改良が続けられた結果、既に定格 300 kV 50 kA のしゃ断器が一点切りで開発され⁽¹⁾⁽²⁾、定格電圧 550 kV 級のしゃ断器も 2 点切りで構成できるようになった⁽³⁾。これらしゃ断器の短絡電流しゃ断性能の検証には、ほとんど 1953 年 AEG 社のワイルおよびドブケ両氏によって発表された合成短絡等価試験法⁽⁴⁾が適用される。一般に大容量の発電機や変圧器は非常に高価であり、短絡試験場でこれら大容量しゃ断器の実負荷試験を可能とする設備の設置は経済的に不可能に近い。従って、前記合成試験法の適用範囲は、きわめて広い。一般に実系統で発生する過渡回復電圧 (Transient Recovery Voltage, 以下 TRV と略す) は単一周波の振動ではなく遅れて波高値の現われる、いわゆる 4 パラメータ TRV になることが多いといわれる。そのために、日本の電力用しゃ断器試験規格 JEC では定格電圧 120 kV 以上、IEC 国際規格⁽⁵⁾では定格電圧 100 kV 以上のしゃ断器について 4 パラメータ TRV を規定している。

従来から電力用しゃ断器の試験に広く用いられるワイル・ドブケ合成短絡等価試験回路の発生する TRV は単一周波の振動であるため、規格に 4 パラメータ TRV が採用されて以来、ワイル・ドブケ回路を 4 パラメータ TRV の発生し得るように改善する回路構成が多数発表された⁽⁶⁾。しかし、一般には回路が高価、複雑であり、制御に高度の技術を要するなどの問題があって、しゃ断試験に実用されたものは少ない。

実用された 4 パラメータ TRV 発生回路を大別すると、(1) 3 電源方式と呼ばれるもので電流源のほか、二つの電圧源回路を持ち TRV の初期部分発生後、高速度に動作する同期式しゃ断器で回路構成を変

更し、第 2 電圧源の印加により波高値を発生するもの⁽⁷⁾⁽⁸⁾、(2) 回路構成の変更なしに、LCR 回路自体で 4 パラメータ TRV を発生するもの⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、に分けられる。

(1) は第 2 章で説明する TRV の発生原理と現象が類似しているために、原理的に波高時間の長い 4 パラメータ TRV の発生に適す。しかし、二つの電圧源や高速度に動作するしゃ断器が必要であるなど、広く実用されるためには、更に改善が望まれる。(2) は電流重量法としては比較的波高時間の短い 4 パラメータ TRV の発生に適し、取扱いが簡単である。しかし、コンデンサ設備容量が比較的小さい場合波高時間の長い 4 パラメータ TRV 発生のためには、例えば電圧重量法に切り換えるなどが必要になる⁽¹²⁾。

本論文では(1)と類似した思想により、電流重量法で波高時間の長い 4 パラメータ TRV を発生し得る、より経済的な回路を提案した。解析的に回路現象を追求め、回路定数計算例および TRV 波形計算結果を紹介するとともに、提案回路の特長などを述べた。

2. 4 パラメータ TRV の発生原理

図 1 は本論文で提案する 4 パラメータ TRV 発生回路を示す⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。ワイル・ドブケ合成等価試験回路の電圧源回路を改良したものである。図 2 は現象説明図である。

はじめに、図 1、図 2 によって 4 パラメータ TRV の発生原理を説明する。低電圧の大電流源 Gen. から電流調整用のリアクトル L を通して補助しゃ断器 ACB、供試しゃ断器 TCB に電流源電流 i_s を供給する。通常、電源保護用のコンデンサ C が図示の位置に接続される。 G_1 は、はじめ閉路状態にある同期しゃ断器を示す。ACB と TCB をほぼ同時に開き、電流源電流 i_s の最終零点直前で制御ギャップ G_2 を放電させて、あらかじめ例えば J 点を直流高電圧に接続して直列に充電しておいたコンデンサ $C_{v1}-C_{v2}$ からリアクトル L_{v1} 、同期しゃ断器 G_1 を通して TCB

Four Parameters TRV Circuit Composed of Two Sources with Repeated Use of Voltage Circuit. By Isao Takahashi, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

高橋 功: 正員, 日立製作所日立研究所

図1 提案した4パラメータ TRV 回路

Fig. 1. A proposed four parameters TRV circuit.

図2 4パラメータ TRV の発生原理

Fig. 2. Principles producing four parameters TRV.

に、電圧源電流 i_0 を供給する。TCB が i_0 のしゃ断に成功すると、コンデンサ $C_{v1}-C_{v2}$ にその時点で残留している、初期充電電圧とは逆極性の電圧が L_{v1} を通して TRV 調整用の抵抗 R_{f1} -コンデンサ C_{f1} 、抵抗 R_{f2} -コンデンサ $C_{f2}-C_{f3}$ の回路に電流 i_1, i_2 を流す。 $R_{f2}-C_{f2}-C_{f3}$ の回路と、電流 i_2 による電圧降下が TCB の極間に印加され、これが TRV の初期部分となる。これを図2では TRV_1 と表示した。コンデンサ C_{f2} の静電容量を C_{f1}, C_{f3} にくらべて十分小さく選んでおくと、 i_1 に比較して i_2 を非常に小さくできる。従って TRV_1 の発生期間中に従来の3電源方式と同様に G_1 を開き次の電流零点で i_2 をしゃ断すると、 TRV_1 はそれ以後1点鎖線で示すように一定になる。 C_{f2} にくらべて C_{f3} の静電容量が十分大きければ、この時点の C_{f3} の対地電圧は低い。

通常、図1の各コンデンサはいずれも多数の素子が直列に接続されている。TRV 波高値発生のために再利用する C_v 素子の直列段数を M とし、この部分を C_{v1} と表示する。 G_1 で電流 i_2 をしゃ断した後、放電制御ギャップ G_3 に指令を送り、リアクトル L_{v2} 、抵抗 R_{f3} を通してコンデンサ C_{f3} を充電する。 G_3 放電後の C_{f3} の対地電圧変化分は図2の TRV_2 の如く変化し、TCB に印加される電圧 (TRV_1+TRV_2) は、

図示の如く4パラメータ表示に適した波形となる。

この場合、 C_{f3} の最高電圧は比較的低いので、その静電容量は大きく選んでも C_{f3} は比較的安価である。インダクタンス L_{v2} は電圧源電流 i_0 から独立に選ぶことができ、もし必要ならば、その数値も大きく選べる。このことが、波高時間の長い4パラメータ TRV を経済的に発生できる理由である。なお、大気中ギャップ G_3 として予想される $5\sim 10\mu s$ 程度の放電のばらつきは、TRV 発生上十分許容できると考える。

また、適用範囲が狭い可能性はあるが、図1のコンデンサ C_{f1} の一部を C_{v1} の代りに用いることもできる。この回路は既設設備の C_v の配置などによっては、例えば配線の長さを短かくできるなど、便利なことがある⁽¹⁵⁾。

3. 本回路による4パラメータ TRV の発生

〈3.1〉 回路定数計算例 IEC 規格の $100\sim 525$ kV の9種の定格電圧に対して、それぞれ代表的な定格しゃ断電流や直列しゃ断点数を選び後述のような方法で計算した回路定数の一例を表1に示す。一般に、図1においてコンデンサ C_{f2} の静電容量を C_{f1} にくらべて小さく選ぶので、 $R_{f2}-C_{f2}-C_{f3}$ の枝路が TRV 初期部分に与える影響は比較的小さい。また、コンデンサは一般に直並列の数を切り換えて使用するため、段階的に数値が変化するので、 C_v の静電容量および C_v 素子の直列段数 N は従来と同様な計算式 (付録参照) で概算して入力データとした。コンデンサ C_{f1} 、 C_{f2} および C_{f3} は前記の大小関係を満足するように選び、規格の指定する TRV の遅れ時間 t_d 、電流 i_2 をしゃ断した後 G_3 が放電するまでの時間 ΔT なども入力データとし、その他のインダクタンス、抵抗およびコンデンサの充電電圧などは連続的に任意の数値が選べるものとした。これらの回路条件は、電圧源電流の商用周波換算値、TRV 初期波高値および TRV 波高値が要求値を満すように自動的に修正計算を繰り返して求めた。

一相あたりのしゃ断点数が多くなると、ユニット試験電圧の初期上昇率要求値は低下するので、コンデンサ C_{f1} の静電容量は大きなものが必要になる。この条件では、 C_{f1} の設備容量が不足することもあり得るので、一般に初期上昇率に関しては、要求値をこえるものも認めるとした。計算式は供試しゃ断器に実在する分布並列コンデンサを無視しているので C_{f2} は前記分布並列静電容量より十分大きく選ぶ必要がある。

〈3.2〉 4パラメータ TRV 計算例 次に試算した回路定数 (表1) による代表的 TRV 波形例を示

表 1 4 パラメータ TRV 回路定数例 (ユニット試験)
Table 1. Examples of circuit constants for 4 parameters TRV (unit test).

定格電圧 (kV)	定格しゃ断電流 (kA)	しゃ断点 数 (点/相)	試験種類	しゃ断電流 番 号 (%)	ケース 番 号	入 力 デ ー タ							出 力 デ ー タ						
						(μF)				(段)	(μs)		(mH)		(Ω)			(段)	(kV)
						C ₀	C _{f1}	C _{f2}	C _{f3}		N	t _d	ΔT	L _{v1}	L _{v2}	R _{f1}	R _{f2}		
100	31.5	1	BTF	100	1	15.0	0.3	0.01	0.45	4	2	10	5.51	0.38	133	934	13.1	1	92.6
				60	2	6.67	0.06	0.005	0.45	6	2	10	8.46	1.87	361	1440	9.99	2	85.3
				30	3	3.33	0.01	0.005	0.45	6	5	10	19.0	2.22	1130	6770	25.7	4	95.9
				100	4	15.0	0.225	0.01	0.45	4	2	10	4.21	0.18	134	937	9.33	1	70.7
				25	5	2.0	0.18	0.01	0.45	10	*	10	41.3	4.23	467	2330	34.8	2	174
123	31.5	1	BTF	100	6	10.0	0.39	0.01	0.45	4	2	10	6.95	0.54	132	1190	18.6	1	117
				60	7	6.67	0.10	0.01	0.45	6	2	10	11.0	0.75	317	4120	22.8	3	111
				30	8	3.33	0.015	0.005	0.45	6	5	10	23.8	3.30	1090	8730	0.52	3	120
				100	9	15.0	0.27	0.01	0.45	4	2	10	5.15	0.40	136	814	11.4	1	86.5
				25	10	1.67	0.27	0.01	0.45	12	*	10	54.4	4.34	441	3970	11.5	2	229
145	31.5	1	BTF	100	11	10.0	0.45	0.01	0.45	4	2	10	8.14	1.22	133	932	26.3	1	137
				60	12	6.67	0.10	0.005	0.45	6	2	10	12.6	4.11	346	1730	20.7	2	127
				30	13	2.50	0.02	0.005	0.45	8	5	10	28.3	4.92	1070	10600	0.82	4	143
				100	14	15.0	0.34	0.01	0.45	4	2	10	6.17	0.47	133	929	15.0	1	104
				25	15	1.67	0.27	0.01	0.45	12	*	10	62.9	12.0	474	2370	6.59	2	264
170	31.5	1	BTF	100	16	6.67	0.54	0.01	0.45	6	2	10	9.76	1.60	133	799	71.5	2	164
				60	17	6.67	0.12	0.01	0.45	6	2	10	14.8	4.12	338	2370	6.27	2	149
				30	18	2.50	0.015	0.01	0.45	8	5	10	32.2	8.58	1140	5700	23.5	5	162
				100	19	10.0	0.34	0.01	0.45	4	2	10	7.11	1.36	143	570	16.8	1	119
				25	20	1.67	0.36	0.01	0.45	12	*	10	76.8	14.5	456	2740	17.4	2	323
245	40	1	BTF	100	21	6.67	0.95	0.055	0.45	6	2	10	11.4	2.02	107	747	81.9	3	242
				60	22	6.67	0.21	0.01	0.45	6	2	10	16.9	14.1	277	1110	26.2	2	216
				30	23	2.00	0.04	0.01	0.45	10	5	10	37.6	18.7	870	6960	2.76	5	241
				100	24	10.0	0.68	0.055	0.45	4	2	10	8.34	0.70	107	749	48.4	2	178
				25	25	1.67	0.42	0.01	0.45	12	*	10	68.5	51.3	399	399	168	3	365
300	50	1	BTF	100	26	6.67	1.48	0.055	0.45	6	2	10	11.5	6.19	86.9	521	131	3	308
				60	27	6.67	0.34	0.01	0.45	6	2	10	16.9	21.8	220	878	35.5	2	270
				30	28	2.50	0.06	0.01	0.45	8	5	10	32.2	21.1	680	6800	20.5	4	258
				100	29	10.0	1.03	0.055	0.45	4	2	10	8.29	2.51	87.6	526	98.0	2	221
				25	30	1.67	0.78	0.055	0.45	12	*	12	74.9	58.2	301	902	218	5	499
362	63	2	BTF	100	31	15.0	3.10	0.055	0.45	4	2	10	5.82	22.1	43.0	43.0	173.0	2	195
				60	32	6.67	1.03	0.055	0.45	6	2	10	9.50	28.4	93.8	563	77.4	3	191
				30	33	3.33	0.18	0.01	0.45	6	5	10	17.3	47.7	302	2420	166	3	174
				100	34	15.0	2.48	0.055	0.45	4	2	10	4.41	10.8	41.8	83.5	142	2	148
				25	35	2.50	1.48	0.055	0.45	8	*	300	40.1	46.9	162	162	3.09	3	337
420	63	2	BTF	100	36	15.0	4.45	0.055	0.45	4	2	10	7.25	24.3	40.2	40.2	227	2	244
				60	37	6.67	1.23	0.055	0.45	6	2	10	11.2	40.2	93.6	562	85.4	3	226
				30	38	3.33	0.18	0.01	0.45	6	5	10	19.7	76.2	323	1290	243	3	199
				100	39	15.0	2.45	0.055	0.45	4	2	10	5.01	19.1	44.8	44.8	148	2	168
				25	40	2.0	1.48	0.055	0.45	10	*	300	48.5	93.7	178	178	237	5	407
525	63	2	BTF	100	41	6.67	1.98	0.055	0.45	6	2	11	8.00	92.6	62.8	62.8	19.3	3	269
				60	42	6.67	1.48	0.055	0.45	6	2	11	14.2	68.2	96.4	482	88.8	3	286
				30	43	3.33	0.25	0.01	0.45	6	5	10	25.2	116	314	1570	301	3	254
				100	44	15.0	4.45	0.055	0.45	4	2	10	6.98	19.6	39.4	78.8	206	2	235
				25	45	1.67	1.12	0.055	0.45	12	*	500	57.6	145	222	222	168	6	484

(注) 1. IEC 規格適用 2. t_d : TRV の遅れ時間規格値 3. *: 脱調に関しては規定なし
4. ΔT : i_2 しゃ断後 G_2 放電までの時間 5. N : C_0 素子の直列段数 6. M : 波高値用に再利用する C_0 素子の数

す。図3は初期波高値と波高値の中間時点で、要求包絡線に対して TRV の落ち込み (Δv) が大きい例として選んだ 300 kV 50 kA 1 点切りしゃ断器の 30% BTF (Breaker Terminal Fault) に関する TRV およ

び G_1 の極間電圧 V_0 を示す。

試験回路としては、規格の指定する、あらゆる短絡電流しゃ断試験に対する TRV を実用的な試験設備で発生できることが望ましい。波高時間が長い点に着目

図 3 30% BTF の TRV 例

Fig. 3. An example of TRV for 30% BTF (300 kV 50 kA circuit breaker).

して、定格電圧の高い、525 kV 63 kA 2点切りしゃ断器を選び、100%, 60%, 30% BTF, SLF (Short

(a) 100% BTF の TRV 例
(a) An example of TRV for 100% BTF.

(b) 60% BTF の TRV 例
(b) An example of TRV for 60% BTF.

(c) 30% BTF の TRV 例
(c) An example of TRV for 30% BTF.

Line Fault) の電源側回路, および脱調に対する TRV 波形例を, 図 4 (a)~図 4 (e) に示す。図 4 (e) の TRV 波高値付近の 1 点鎖線は, L_{v2} を小さくすることを目的に, G_3 の放電時刻を故意に遅らせ, L_{v2} を半減した場合を示す。以上の例から, 図 1 で規格の TRV を発生できることがわかる。

〈3.3〉 TRV の評価 前節で述べたように, 提案した 4 パラメータ TRV 発生回路では, TRV の初期上昇率, 初期波高値および波高値のうち, C_{r1} 設備不足の場合の初期上昇率を除き, すべて要求値を満たすことができる。また, 表 1 の計算例からも明かなように, 定格電圧, 定格しゃ断電流, しゃ断試験の種類などによらず要求される TRV を発生することができる。

現在の規格では, 初期波高値と波高値の中間時点での包絡線からの落ち込みについては, JEC, IEC とともに規定がない。図 5 は表 1 の全ケースについてこれを示したものである。落ち込み Δv が 20% をこえるのは 45 ケース中 4 ケースにすぎず, 特に, 定格電圧が 362 kV 以上では, 故意に ΔT を大きくした (+) 印の場合を除き, はば 10% 以内であり満足すべきものとする。将来は規格に Δv の許容限界が明示され

(d) SLF の電源側 TRV 例
(d) An example of TRV for SLF source side.

(e) 脱調の TRV 例
(e) An example of TRV for out of phase.

図 4 525 kV 63 kA しゃ断器のユニット試験電圧 (2点切り)

Fig. 4. Unit test voltages for an 525 kV 63 kA circuit breaker (two breaks per pole).

図 5 TRV の落ち込み例

Fig. 5. Examples of TRV drops.

る方向に進むものと思われる。

4. G_1 の責務と機器の選定

図 1 の G_1 として、これまで同期式しゃ断器として説明してきた。3 電源方式では、既に同期式しゃ断器をそのように実用している⁽⁷⁾。一般に開極時間の短いしゃ断器は、そのばらつきも少ないと考えられる。

例えば、1 サイクル級バッファ式しゃ断器⁽¹⁶⁾の開極時間は、およそ 5 ms であり、電圧源電流通電期間中に開極する方法で、図 1 の G_1 として使用できるものと思われる。開極直後のしゃ断性能は低く、TCB の性能判定に与える影響は少ないと考える。

G_1 に要求されるしゃ断責務の最大値を表 1 の回路定数についてまとめると、極間電圧については図 6 が得られる。表 1 に示した範囲内では、300 kV、50 kA 1 点切りしゃ断器の脱調しゃ断試験の場合に、 G_1 の極間電圧が最大で約 300 kV となる。図示は省略するが、 G_1 に関するその他の責務最大値は、電流変化率 0.49 A/μs (60 Hz 商用周波換算実効値約 920 A)、初期上昇率約 1.0 kV/μs 程度である。また表 1 の場合、電流 i_2 の波高値は約 10 A~100 A の範囲にある。

一方、SF₆ ガス中の固定ギャップも極間電圧の初期上昇率が低ければ、ある程度のしゃ断性能があり⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、 G_1 として、トリガー付きガスギャップも使用できる可能性がある⁽¹⁹⁾。消弧性能が不足の場合は、吹付のあるギャップ、真空ギャップも考えられる⁽²⁰⁾。実験的に、 G_1 として最適なものを選択することが今後の最も重要な研究課題となる。

5. 従来方式との比較と提案回路の特長

公知の代表的 4 パラメータ TRV 発生回路を図 7 ~

図 6 G_1 の極間電圧Fig. 6. Voltages between opened G_1 .

図 10 に示す。図 7 ~ 図 9 は TRV 発生開始以後に、回路の接続変更のないもの、図 10 はそれがあつた場合を示す。図 8 (a) は直接試験回路として示されているが、図 8 (b) の如くワイル合成等価試験に適用でき

図 7 A方式の回路

Fig. 7. Circuit-A.

図 8 B方式の回路

Fig. 8. Circuit-B.

図 9 C方式の回路

Fig. 9. Circuit-C.

図 10 D方式の回路
Fig. 10. Circuit-D.

図 11 他方式との TRV 波形比較例

Fig. 11. An example of comparison of TRV forms between test circuits.

る。

実用可能な回路は電圧源のコンデンサ設備容量によっても異なる。海外の中立試験機関の設備容量は、3~7 MJ 程度もあって、国内メーカの少くとも 2.5~6 倍以上もある。このように、設備容量が大きい場合には、図 7、図 8 の方式などが選ばれている。

比較的小さなコンデンサ設備容量で波高時間の長い 4 パラメータ TRV を発生する工夫もなされ、例えば前述の如く定格 550 kV、63 kA のパuffer式ガスしゃ断器の全点試験時に、図 9 の回路が電圧重畳法として採用された例がある⁽¹²⁾。次に TRV 比較例を図 11 に示す。IEC 規格の 525 kV、63 kA 2 点切りしゃ断器の一しゃ断点 (電圧分担 55%) を対象としたもので、本論文の図 1 による計算結果を曲線 a で示す。初期上昇率が要求値に対してか酷になっているが、波高値は時間的にも、電圧的にも要求を満たす。これに対して、同程度の電圧源コンデンサ設備容量を仮定して、図 8 (b) の方式でアメリカ BPA の開発になる EMTP (Electromagnetic Transient Program) により、計算した TRV 波形を曲線 b に示す。規定の波高時間で、要求される電圧波高値の約 50% 程度しか印加できなかったことがわかる。図 9 に示す回路も波高値付近に関して大体同様な特性がある。接続変更のない回路で

電流重畳法として波高時間の長い 4 パラメータ TRV を発生するには、膨大な電圧源コンデンサ設備容量を必要とする。

図 10 は 3 電源方式と呼ばれる。第 2 の電圧源としては、図 10 の如く充電したコンデンサ、または高電位部に設置した変圧器が利用される。高電位の変圧器を用いる方式で、550 kV 41 kA 4 点切り圧縮空気しゃ断器のユニット試験に適用した例が報告されている⁽⁷⁾。試験電圧が高い場合には、コンデンサを使った図 10 の方が取り扱いが便利と考えられる⁽⁸⁾。

本論文図 1 は、図 10 の 3 電源方式に対して、

- (1) 第 2 電圧源用コンデンサ C_h が不要。
- (2) 第 2 電圧源の充電装置 HV2 が不要。
- (3) TRV 発生直後に、開極する同期しゃ断器 SH_2 の代りに、より経済的な SF_6 ガス・キャップやパuffer式ガスしゃ断器を利用できる可能性がある。
- (4) TRV 波高値を発生するために、ワイル回路に追加する回路は低圧側にあるため、追加回路の対地絶縁は低くてよい。(例えば図 10 の方式に比べ約 35%)。

(5) 回路定数の選び方によって変るが、大多数の計算例では、TRV 波高値発生のために遅れて印加する電圧は図 1 の方式が低くてすむ。図 10 の方式では SH_2 の極間電圧そのものを印加するのに対して、図 1 の方式では、 G_1 で電流をしゃ断した時点の初期波高値に近い TRV の値と、波高値 u_c との差 (図 4 (a) 参照) のみ印加すればよい。

(6) 回路定数の選定が容易である。図 10 の方式では時間的に変動する e_{r1} に対して、電圧 e_{r2} を加算するのに対して、図 1 の方式では G_1 を通る電流しゃ断後の直流電圧に対して電圧を加えるためである。

以上述べた (1)~(5) は、いずれも回路のコスト・ダウンに役立つ。(6) は建設コストには直接関係はないが、実用上好ましいことである。

適用範囲は比較的小さいと予想されるが、もし付図 1 の回路を実用する場合には、図 1 に対して、更に放電制御ギャップを 1 個省略できるので取扱いがもっと便利になる。従来の 3 電源方式 4 パラメータ TRV 発生回路に対して、本論文で提案した図 1、付図 1 の方式は、波高時間の長い 4 パラメータ TRV を、より経済的に発生できるという特長がある。

6. む す び

定格電圧の高いしゃ断器に要求される波高時間の長い 4 パラメータ TRV を経済的に発生できる回路構成

を追求した結果、ワイルドブケ回路の電圧源回路の一部を再利用し、従来の3電源方式に比較して充電装置およびコンデンサの設備容量を節約した経済的な回路を考案することができた。

表1に示すように定格電圧100kV～525kVに対してIEC規格の各種しゃ断条件を想定して、回路定数を試算、TRV波形を評価するとともに、付録に示した実験を行なった結果、実用性に明るい見通しを得た。

今後、実規模の実験を行なうことにより、本試験回路の実用化をはかりたい。

終りに、本研究の推進に御激励いただいた(株)日立製作所日立研究所長、高砂常義博士に深く感謝致します。また御指導、御討論を頂いた同所第2部長吉岡芳夫博士、ならびに同所国分工場しゃ断器設計部長中野清蔵氏、副技師長細川正男氏に謝意を表します。

(昭和58年7月20日受付)

文 献

- (1) 松村, 他: 昭 56 電気学会全大 No. 1168
- (2) 高木, 他: 昭 57 電気学会全大 No. 1063
- (3) 西田, 他: 日立評論 64, 9, 37 (昭 57-9)
- (4) 電気学会: 交流しゃ断器 (JEC-181-1975)
- (5) IEC Standard: (Amendment No. 4 June 1981) Pub. 56-2, 1971
- (6) 電気学会常置専門委員会: 技術報告 (II部) 第46号 (昭 51-7)
- (7) J. Tomiyama, et al: CIGRE 13-02 (1974)
- (8) 西条, 他: 特公昭 52-9832
- (9) Cesi: VISITA del 12 Giugno 1981 al NUOVO LABORATORIO GPS
- (10) V.N. Narancic: IEEE C 73-054-4
- (11) S. Yamashita, et al: IEEE F 78-147-1
- (12) 溝口, 他: 昭 53 電気学会東京支大 No. 976
- (13) 高橋: 昭 56 電気学会全大 No. 174
- (14) 高橋: 昭 57 電気学会全大 No. 1065
- (15) 高橋: 昭 58 電気学会全大 No. 1210
- (16) K. Natsui, et al: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-99, 3, pp. 833 (1980)
- (17) K. Anjo, et al: CIGRE 33-01 (1976)
- (18) 溝口, 他: 昭 56 電気学会全大 No. 1020
- (19) 後藤, 他: 昭 54 電気学会東京支大 No. 154
- (20) 佐野, 他: 昭 54 電気学会東京支大 No. 166

付 録

1. 回路定数の概算 しゃ断器の一相あたりの直列しゃ断部の数を n , 電圧分担率を k , しゃ断電流および電流源電流の周波数をそれぞれ I (A), f (Hz) とすると, 計算の第1段階の回路定数は例えば次式で求まる。(図1参照, $E_v = E_{v1} + E_{v2}$, $C_v = C_{v1}C_{v2}/(C_{v1} + C_{v2})$).

$$E_v = U_1 \cdot (k/n) \cdot (C_v + C_{f1}) / C_v \dots\dots\dots (付 1)$$

$$L_{v1} = E_v / (2\sqrt{2}\pi f I) \dots\dots\dots (付 2)$$

$$C_v = 1 / ((20\pi f)^2 \cdot L_{v1}) \dots\dots\dots (付 3)$$

$$N \geq E_v / V_{cv} \dots\dots\dots (付 4)$$

ここで, U_1 は IEC 規格の4パラメータ TRV の初期波高値, N は C_v の直列段数, V_{cv} は電圧源コンデンサ C_v の1段あたりの耐圧であり, 電圧源電流の周波数を $10f$ としている。TRV の初期部分が直線的に上昇するとし, t_1 を初期波高時間とすれば,

$$R_{f1} = (U_1/t_1) \cdot (k/n) / (2\sqrt{2}\pi f I) \dots\dots\dots (付 5)$$

$$C_{f1} = L_{v1} / (R_{f1}^2) \dots\dots\dots (付 6)$$

2. TRV 計算式 (付1～6)式で概算後は付表1に示す手順で回路定数を決定する。解析的に求めた i_1 , i_2 および TRV の計算式は, 電流 i_2 が時刻 t_0 でしゃ断されるまでは次式で表現できる。TRV 計算のための三次方程式および次の計算式の係数をそれぞれ, 付表2, 付表3に示す。

$$i_1(t) = A_1 \{ B_1 e^{-\alpha_1 t} + (B_2 \sin \beta_1 t - B_1 \cos \beta_1 t) e^{-\alpha_2 t} \} \dots\dots\dots (付 7)$$

$$i_2(t) = A_1 \{ A_2 e^{-\alpha_1 t} + (A_3 \sin \beta_1 t - A_2 \cos \beta_1 t) e^{-\alpha_2 t} \} \dots\dots\dots (付 8)$$

$$\text{TRV}(t) = A_4 + A_5 e^{-\alpha_1 t} + (A_6 \sin \beta_1 t + A_7 \cos \beta_1 t) e^{-\alpha_2 t} \dots\dots\dots (付 9)$$

図1において, G_1 で電流 i_2 をしゃ断後, ギャップ G_3 を放電するまでの期間では,

$$\text{TRV}(t) = \text{TRV}(t_0) \dots\dots\dots (付 10)$$

また, この期間の L_{v1} を通る電流 i_1' , $R_{f1} - C_{f1}$ ブランチの電圧 $V(t)$ は, $t = t_0$ における C_{f1} の対地電圧を V_{t0} として,

$$i_1'(t) = \{ i_1(t_0) \cdot \cos \beta_2(t - t_0) + A_8 \cdot \sin \beta_2(t - t_0) \} e^{-\alpha_3(t - t_0)} \dots\dots\dots (付 11)$$

$$V(t) = V_{t0} + A_9 + \{ \{ R_{f1} i_1(t_0) - A_9 \} \cdot \cos \beta_2(t - t_0) + A_{10} \sin \beta_2(t - t_0) \} e^{-\alpha_3(t - t_0)} \dots\dots\dots (付 12)$$

但し, $\alpha_3 = R_{f1} / (2L_{v1})$

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{1}{L_{v1}} \left(\frac{1}{C_{f1}} + \frac{1}{C_v} \right) - \alpha_3^2}$$

電流 i_2 しゃ断直後のギャップ G_1 の極間電圧上昇率は, この時点の C_v の電圧を E_{v0} として,

$$\left(\frac{dV}{dt} \right) = \frac{i_1(t_0)}{C_{f1}} + \frac{R_{f1}}{L_{v1}} \{ E_{v0} - V_{t0} - R_{f1} \cdot i_1(t_0) \} \dots\dots\dots (付 13)$$

次にギャップ G_3 放電後の TRV 変化分は, G_3 放電時点をおらためて時間の原点と考えると次式を得る。

$$\Delta \text{TRV} = \frac{C_{v1}}{(C_{v1} + C_{f3})} \cdot (V_{10} - V_{f30}) \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\cos \theta_2} \cdot e^{-\alpha_4 t} \cdot \cos(\beta_3 t - \theta_2) \right\} \dots\dots\dots (付 14)$$

付表 1 フローチャート
app. Table 1. A flow chart.

但し,

$$\left. \begin{aligned} \beta_3 &= \frac{\pi}{t_2 - (t_0 + \Delta T)}, \quad \theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_4}{\beta_3} \right) \\ \alpha_4 &= -\frac{\beta_3}{\pi} \\ &\cdot \log_e \left\{ \frac{(U_C - \text{TRV}(t_0))(C_{V1} + C_{F3})}{C_{V1}(V_{10} - V_{F30})} - 1 \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{付15})$$

これから、最適な L_{v2} , R_{f3} が次式により求まる。

$$\left. \begin{aligned} L_{v2} &= \frac{(C_{V1} + C_{F3})}{C_{F3} \cdot C_{V1}(\alpha_4^2 + \beta_3^2)} \\ R_{f3} &= \frac{2\alpha_4(C_{V1} + C_{F3})}{C_{F3} \cdot C_{V1}(\alpha_4^2 + \beta_3^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{付16})$$

ここで、 t_2 , U_c はそれぞれ波高時間および波高値である。

3. 実験結果 第2章の最後の部分で述べたように、TRV 波高値の発生のために G_v の代りに多段に直列接続された C_{f1} の一部を再利用することを考え、更に L_{v2} に接続されたギャップ G_3 を省略すると、取扱いの容易な付図1が得られる。この回路で、ACB₂にも2点切りガスシャ断器(SF₆ガス: 4 bar(ゲージ))

付図 1 実験回路
app. Fig. 1. An experimental circuit.

付表 2 三次方程式
app. Table 2. A cubic equation.

$$AX^3 + BX^2 + CX + D = 0$$

Where, $A = L_{v1}(R_{f1} + R_{f2})$
 $B = R_{f1}R_{f2} + (1/C_{f1} + 1/C_{f2}) \cdot L_{v1}$
 $C = (1/C_{f1} + 1/C_v) \cdot R_{f2} + (1/C_{f2} + 1/C_v) \cdot R_{f1}$
 $D = (1/C_{f1} + 1/C_v) / C_{f2} + 1 / (C_{f1} \cdot C_v)$
 Answer: $X_1 = -\alpha_1$, $X_2 = -\alpha_2 + j\beta_1$,
 $X_3 = -\alpha_2 - j\beta_1$ ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$: Real)

付表 3 数式の係数
app. Table 3. Coefficients of equations.

$$\begin{aligned} A1 &= \frac{E_v}{L_{v1}(R_{f1} + R_{f2})} \{ (\alpha_1 - \alpha_2)^2 + \beta_1^2 \} \\ A2 &= (1/C_{f1} - R_{f1} \cdot \alpha_1) \\ A3 &= (1/C_{f1} - R_{f1} \cdot \alpha_2) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + R_{f1} \cdot \beta_1^2 / \beta_1 \\ A4 &= \frac{A1}{C_{f2}} \cdot \left\{ \frac{A2}{\alpha_1} + \frac{(A3 \cdot \beta_1 - A2 \cdot \alpha_2)}{(\alpha_2^2 + \beta_1^2)} \right\} \\ A5 &= A1 \cdot A2 \cdot \{ R_{f2} - 1 / (C_{f2} \cdot \alpha_1) \} \\ A6 &= A1 \cdot R_{f2} \cdot A3 - \frac{(A3 \cdot \alpha_2 + A2 \cdot \beta_1)}{C_{f2} \cdot (\alpha_2^2 + \beta_1^2)} \\ A7 &= -A1 \cdot \left\{ R_{f2} \cdot A2 + \frac{(A3 \cdot \beta_1 - A2 \cdot \alpha_2)}{C_{f2} \cdot (\alpha_2^2 + \beta_1^2)} \right\} \\ A8 &= \{ (E_{v0} - E_{c10}) / L_{v1} - i_1(t_0) \cdot \alpha_2 \} / \beta_2 \\ A9 &= \frac{(E_{v0} - E_{c10})}{(\alpha_2^2 + \beta_2^2) \cdot C_{f1} \cdot L_{v1}} \\ A10 &= \{ -A9 \cdot \alpha_3 + i_1(t_0) / (1/C_{f1} - R_{f1} \cdot \alpha_2) \\ &\quad + R_{f1}(E_{v0} - E_{c10}) / L_{v1} \} / \beta_2 \\ B1 &= 1 / C_{f2} - R_{f2} \cdot \alpha_1 \\ B2 &= \{ (1/C_{f2} - R_{f2} \cdot \alpha_2) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + R_{f2} \cdot \beta_1^2 \} / \beta_1 \end{aligned}$$

付表 4 実験条件

app. Table 4. Constants for an experiment.

単位	諸 値	数 値
kV	E_v	60
mH	L_{v1} L_{v2}	9.79 5.2
μF	C_v C_{f11} C_{f12} C_{f2} C_{f3}	6.67 0.9 1.35 0.01 0.78
Ω	R_{f1} R_{f2} R_{f3}	137 1000 0

付図 2 実験による TRV
app. Fig. 2. TRV of an experiment.

を用いて、付表 4 の回路条件で、電圧源電流 i_0 の通電期間中に ACB₂ を開極して小規模な実験を行なった。付図 2 に示すように、4 パラメータ TRV が得られ、アイデアに原理的な誤りがないことを確認した。