電力用としての真空遮断器・開閉器

赤 池 正 宏^{*1}

(受理1999年5月24日, 掲載決定1999年11月6日)

The Vacuum Circuit Breakers and Switches for Electric Power Systems

Masahiro AKAIKE^{*1}

(Tokyo Electric Power Company, Saitama Branch Office,
Power System Planning Dept. General Manager Kitauraawa 5-14-2 Urawa-shi 336-0002 Saitama)

(Received May 24, 1999, Accepted November 6, 1999)

1. ま え が き

電力用の遮断器・開閉器などには長い間、もっぱら油入のものが使用されていた。これは古くから油が絶縁材料として使用されてきており、その特性が十分知られていることに加え、機器としての構造も比較的容易に製造可能で、かつ扱いも容易であったことが大きな理由である。しかしながら、機器のコンパクト化には限界があり、さらに配電線で使用されていた油入開閉器が落雷や油の劣化によって内部短絡した結果、噴油するという事態が生じた。このため機器のコンパクト化と安全対策の両面から、油に替わる絶縁材料の採用が急務となった。

絶縁方式には、気中、ガス、真空の3方式があったが、気中方式は当時開放型が多く大気中の排気ガスや塩分などで接触子の表面が腐食し、しばしば接触不良を起こすという問題が発生していた。また、ガスは一般的には絶縁性能に優れる六フッ化硫黄 (SF_6) が使用され、コンパクト化には極めて有効なものであったが、当時の製造技術ではアークによる分解生成物や腐食対策としての外箱へのステンレス鋼の使用などの面で課題があった。

一方、真空方式は接触子を真空中に設けなければならないが、そのために磁器製の気密円筒容器内に接触子を封じ込め、内部を 10^{-4} Pa程度の真空にした「真空バル

ブ」(vacuum bulb) と称するユニットが実用に達しており、これによりコンパクト化と安全性を確保することとなった。

なお、各種遮断器それぞれの特長比較を表1に示す。

以下、これら電力用真空遮断器・開閉器の概要を、その発展の経緯を含めて紹介する。

2. 電力に用いられる真空遮断器・開閉器

発電所から高電圧の送電線により消費地に送られてくる電力は、配電線を通じて各家庭やビル施設などの需要家に届けられる。一般には配電用変電所から6 kVの架空配電線あるいは地中ケーブルにより送り出され、需要家近くの電柱上、路上、地中あるいは建物の一角などに設けられた変圧器により100 Vあるいは200 Vに降圧されて届けられる。これら一連の電力流通経路において、主として真空遮断器、真空開閉器は次の箇所に使用されている。

○真空遮断器……変電所の6~154 kV 遮断器

○真空開閉器……6 kV 配電線の開閉器

遮断器と開閉器の違いは、概ね以下のとおりである。

配電線への落雷等の事故により短絡事故が発生すると大電流が流れる。そこで、この事故電流を遮断するために、変電所に設けられるのが遮断器である。一方、配電線路において工事を行う際に停電区域をできるだけ狭く限定するため、あるいは配電線事故が発生したときに故障区間を切り離して健全範囲を送電するため、配電線路の途中の随所に線路を区分するために設けられるのが開

^{*1} 東京電力株式会社 埼玉支店 設備計画部長
(〒336-0002 埼玉県浦和市北浦和 5-14-2)

表 1 各種遮断器の特徴比較

比較項目		種類	タンク形油遮断器 (OCB)	真空遮断器 (VCB)	磁気遮断器 (MBB)	SF ₆ ガス遮断器 (GCB)
消弧性能	消弧原理		タンク上部にブッシングを備え、ブッシング下部に固定可動接触子、消弧室を備えている。油は消弧材として使われるほか、対地、相间、極間の絶縁材として使用される。	高真空中での荷電粒子の高速拡散及びアーク痕跡上での急速再結合。高真空中での分割アークの陰極点の移動。但し、大電流は磁気駆動による。 この駆動はアーク接触子の構造と遮断電流とによる。	遮断電流自身が駆動線輪に流れ、これによる磁器力によりアークを消弧室内に強制的に移動させ、アークの冷却面積を増大させ、またアーク長を増大させて消弧する。	SF ₆ ガス吹付、または、磁界により SF ₆ ガス中でアーク駆動。
	特 質		(1) アーク時間は 2～3 サイクル (2) 完全な無再点弧ではない。 (3) 充電電流遮断性能が劣る。 (4) 遮断部は外気の影響を受けない。	(1) アーク時間は遮断電流全域にわたり 1 サイクル以下。 (2) 電流遮断、高周波消弧により過電圧を発生する場合がある。 (3) リアクトル・コンデンサ開閉にも適する。 (4) 遮断性能は外気の影響を受けない。	(1) アーク時間は 1～2 サイクル (2) 電圧敏感形で異相。脱調遮断が困難である。 (3) 容量性遮断時に再点弧の危険性がある。 (4) 臨界電流が存在する。 (5) ガスが外部へ出る。 (6) 遮断音が激しい。 (7) 外気の状態が遮断性能に直接影響を及ぼす。	(1) アーク時間は 1 サイクル以下 (2) 異常電圧の発生がない。 (3) 液化温度に注意が必要である。 (4) 絶縁回復特性が良好である。
遮断時間			5 又は 8 サイクル	3 又は 5 サイクル	5 サイクル	3 又は 5 サイクル
アークスペース			不 要	不 要	要	不 要
構造・外形寸法			やや大型	極めて小型で簡単	複 雑	普 通
保守点検			油の取り扱い、接点調整に手数がかかる。	ほとんど不要	複 雑	ガスの排出・封入あり
火災の危険度			危険性あり	不燃性	難燃性	不燃性
多 頻 度 性			普 通	適	普 通	適
開閉寿命	機 械 的		1 万回	1 万回	1 万回	1 万回
	電 気 的		普 通	長 い	普 通	長 い
高速度再投入			普 通	適	普 通	適
系 列 化			普 通	良	一部のみ	一部のみ
経 済 性			普 通	安 価	やや高価	高 価

閉器である。

このように、開閉を行うという基本的な機能に関しては同じであるが、短絡事故などが発生したときに流れる

大電流を遮断できるものを「遮断器」と呼び、負荷の開閉や短絡電流の投入・短時間通電はできるが遮断はできないものを「開閉器」と呼んでいる。

図1 真空バルブの内部構造例

3. 真空遮断器・開閉器の開発経緯

真空開閉器は、接触子が真空中に設けられなければならないため、磁器製の気密円筒容器内に接触子を封じ込め、内部を 10^{-4} Pa 程度の真空にした「真空バルブ」と称するユニットを使用している。その内部構造例を図1に示す。

真空を維持したまま接触子を開閉するために、軸の一方にベローズを設けて、接触子を軸方向に動かすようにし、接触可能にしてある。また接触子間に発生するアークは、接触子から蒸発した金属蒸気により構成されているので、それが絶縁容器の内壁に付着凝固して導電性の被膜を形成すると電極間の絶縁耐力を低下させるので、接触子の周囲をアークシールドと称する金属製の円筒で保護している。

信頼性のある真空バルブを製造するには高度の技術が必要であるが、接触子が真空中にあるために外気の影響を受けず、接触子の酸化や腐食がないので、無保守無点検で長期にわたり安定した性能を維持することができる。また開閉時のアークによる消耗も極めて少ないので多数回の開閉ができる。それに、密閉容器中で開閉を行うのでアークや高温ガスを外部に放出することがない。そこで時流に適應した遮断器・開閉器として、開発が進められた。

ところで、真空中に設けた接触子で電流を遮断するという発想はいつ頃生まれたのであろうか？

低気圧の気体ないし真空中の放電に関心が持たれたのは19世紀に入ってからのことであるが、1910年頃実用的な真空ポンプが得られるようになると、早速真空中で接触子を開いて電流を遮断しようという構想が生まれている。しかし実際に真空バルブを製作して一連の実験を行ったのは米国カリフォルニア工科大学の Sorensen 教授らであって、1926年に最大41.5 kV、926 A の遮断に成功

したとの報告¹⁾がなされ、電力用開閉機器への応用に対して期待が寄せられた。そこで早速米国の General Electric 社が強力な研究を開始したが、結局製品化に成功したのは1962年のことであった²⁾。このように長期間を要したのは次のような問題があったからである³⁾。

- (1) セラミックスと金属とを気密に接合する方法。
- (2) 電流を遮断すると接触子から吸蔵ガスが大量に放出される問題。

これらの問題の解決には工業的規模で高真空が得られるようになった真空技術の発達に合わせて、電子管や半導体産業の発展に伴う材料技術の発達に負うところが大きい。

我が国でも1960年には真空バルブの研究・開発が始められ、1965年には7.2 kV の高圧電動機用真空スイッチが製品化された⁴⁾。さらに1966年には7.2 kV で12.5 kA⁵⁾を、また翌1967年には7.2 kV で20 kA を遮断できる真空遮断器が作られた。そして1967年には架空配電用の柱上形真空開閉器が発表されている⁶⁾。

このような背景があったので、前述のようなオイルレス化の要請に、真空遮断器・開閉器がいち早く応えることができたといえるであろう。

4. 真空遮断器の適用状況

真空遮断器は1965年に製品化されたが、初期においては多くの特長を有しているにもかかわらず、コスト面との兼ね合いもあり伸び悩みがあった。しかしその後の研究・開発により採用台数は増加してきた。1972年～1974年の経済不況により、高度経済成長時代に幕が降ろされると、電気設備にも省力化、経済性が一層強く求められるようになった。そのため軽量・小型で長寿命、消弧部のメンテナンスフリー、火災の危険性が無いなどの特長を備えた真空遮断器が注目され、1977年以降高い採用率を確保するに至っている。

電圧別の採用状況を見ると、真空遮断器は、168 kV 以下で採用されており、7.2 kV が90%以上の非常に高い採用状況となっているが他の電圧クラスでは非常に少ない。また、高い採用率を誇る7.2 kV の遮断電流別の採用状況をみると遮断電流8～16 kA が約60%、20～25 kA が約40%を占めている。表2に真空遮断器の定格の標準値を示す。

4.1 水力発電部門における真空遮断器の適用状況

過去の採用状況の推移をみると全体的に増加の傾向が伺えるが、本格的な採用は昭和50年以降である。昭和56年頃、一時的に高い採用率に達したが、その後はまた低い採用率となっている。

また、遮断電流別にみると7.2 kV においては、25 kA

表2 定格の標準値

定格電圧 [kV]	定格遮断電流 [kA]	定格遮断時間 [サイクル]			定格電流 [A]							定格投入電流 [kA]	定格遮断容量 [MVA]
		2	3	5	600	800	1,200	2,000	3,000	4,000	6,000		
3.6	16			○	○		○					40	100
	25			○	○		○					63	160
	40			○	○		○	○	○			100	250
7.2	12.5			○	○		○	○	○			31.5	160
	20			○	○		○	○	○			50	250
	31.5			○			○	○	○			80	390
	40			○			○	○	○			100	500
12	25			○	○		○					63	520
	40			○			○					100	830
	50			○			○					125	1,000
	80			○			○					200	1,700
24	12.5			○	○		○					31.5	520
	20			○	○		○					50	830
	25			○	○		○	○	○			63	1,000
	40			○			○	○	○			100	1,700
	50			○			○			○		125	2,100
				○									
	63			○				○	○	○		160	2,600
36	12.5			○	○		○					31.5	780
	16			○	○		○	○				40	1,000
	25			○	○		○	○	○			63	1,600
	31.5			○			○	○	○	○		80	2,000
	40			○			○	○	○	○		100	2,500
72	20			○		○	○	○	○			50	2,500
	25		○	○		○	○	○	○	○		63	3,100
	31.5		○	○			○	○	○	○		80	3,900
	40		○	○			○	○	○	○		100	5,000
84	20			○		○	○					50	2,900
	25		○	○			○	○	○			63	3,600
	31.5		○	○			○	○	○			80	4,600
120	25			○			○	○				63	5,200
	31.5			○			○	○	○	○		80	6,500
	40			○				○	○	○	○	100	8,300
168	25			○			○	○	○	○	○	63	7,300
	31.5			○			○	○	○	○	○	80	9,200
	40			○				○	○	○	○	100	12,000

[JEC-2300]

(注) 遮断容量とは、その遮断器を適用できる系統の三相短絡容量（三相短絡事故が発生した際に、遮断器を通過する電力）の限度を示し、次式によって求め参考値とする。

$$\text{遮断容量 [MVA]} = \sqrt{3} \times \text{定格電圧 [kV]} \times \text{定格遮断電流 [kA]}$$

図2 柱上真空開閉器の内部構造例

表3 7.2 kV 柱上真空開閉器、定格一覧表

定 格 電 圧	7.2 kV	
定 格 電 流	300 A, 600 A	
極 数	3	
短 時 間 電 流	12.5 kA, 1 秒間	
投 入 電 流	31.5 kA, 10回	
定 格 周 波 数	50 Hz, 60 Hz	
温 度 上 昇	最大55 k	
無電圧開閉性能	3000回	
負荷開閉性能	2000回	
商 用 周 波 耐 電 圧	対地間	22 kV, 1 分間
	相 関	22 kV, 1 分間
	極 間	35 kV, 1 分間
雷インパルス耐電圧	対地間	65 kV
	相 関	75 kV
	極 間	85 kV

以下が大多数を占め、10 kV 以上のクラスでは、低容量 (8~16 kA)、中容量 (20~25 kA)、大容量 (31.5 kA 以上) がほぼ同程度の採用率となっている。

4.2 リアクトル・コンデンサ開閉用遮断器の適用状況

昭和50年までは増加傾向にあるものの、採用台数は少なかった。しかし、それ以降は真空遮断器の活用が増加し、採用台数が増加している。

4.3 火力・原子力発電部門における真空遮断器の適用状況

火力・原子力発電部門としては、従来、磁気遮断器が主流であったが、昭和50年以降急速に真空遮断器・ガス遮断器に移行している。

同部門では、40 kA, 63 kA の大容量真空遮断器が多数採用されている。

4.4 変電部門における真空遮断器の適用状況

過去の採用状況の推移をみると全体的に増加の傾向を示し、本格的な採用は昭和45年頃の早い時期からであり昭和51年には全採用遮断器の50%を越え、昭和52年には約91%を占めるまでになった。

また、遮断電流別にみると7.2 kV においては、25 kA 以下が大多数を占め、水力発電とほぼ同じ傾向を示しているが、10 kV 以上のクラスにおいては、水力発電と異なり25 kA 以上が大多数を占めている。

5. 真空開閉器の適用状況

真空開閉器は主として架空、地中配電系統において広く採用されている。6 kV 架空配電線に用いられる柱上

図3 多回路開閉器の回路構成

真空開閉器の定格の例を表3、内部構造を図2に示した。

全体を上部のハンガーにより電柱の腕金に吊して固定している。開閉器の外箱は気密構造になっているので、腐食性ガスや湿気が内部へ進入して絶縁物を劣化させたり、操作機構部に発錆を生じさせることがないようにしている。また、万一内部で短絡が生じて箱内の圧力が急上昇しても、公衆災害を招くような破損は生じないように考慮している。

ケーブルによる地中配電線には、路上、あるいは地下に設置する多開路真空開閉器が用いられる。これは真空開閉器5台分を用いて図3のような回路を構成し、600Aの幹線から400Aの負荷回路4回線に分岐して、配電している。その構造を図4に示した。

6. 真空遮断器の課題

真空遮断器は1965年に製品化されて以来、今日では7.2 kV以下の電圧階級においては非常に高い適用率を占めている。

これは真空遮断器の高信頼性、多頻度特性、安全性、さらに保守・点検の容易性が今日のニーズに合致していることによるものである。

さらに今後は、電力需要の増加に伴い、電気設備容量がさらに増大することが予想されることから、遮断器の遮断性能についても一層の高度化が求められている。すなわち、定格電圧はこれまでの7.2 kV、72 kV級から168 kV級へと高電圧化しており、遮断電流についても31.5 kA、40 kA級から63 kA、さらには100 kA級へと増大しており、それに伴った遮断器の製品化が進んでいる。

図4 多回路真空開閉器の構造

現在のところ72 kV級以上ではガス遮断器、それ以下では真空遮断器が経済的に有利であるとされているが、今後は真空遮断器の特徴を活かした、より低コストな遮断器の開発・製品化が期待される。

7. む す び

以上、電力系統に用いられている真空遮断器・開閉器について概説した。電力用の機器は長い年月にわたり、高い信頼性を確保しなければならないが、真空技術、材料技術の著しい発達に支えられて登場したこれらは、その要請に応じて広く普及している。

〔文 献〕

- 1) R. W. Sorensen, H. E. Mendenhall: "Vacuum Switching Experiments at California Institute of Technology", AIEE Trans., Vol. 45, p1102 (1926).
- 2) T. H. Lee, at.: "Development of Power Vacuum Interrupters", AIEE Trans. Power App. & Syst., Vol. 81, p629 (1963).
- 3) J. D. Cobine: "Research and Development Leading to the High Power Vacuum Interrupter-A Historical Review", AIEE Trans. Power App. & Syst., Vol 82, p201 (1963).
- 4) 川越哲夫, 他: 「高圧電動機用真空スイッチ」, 昭和40年 電気四学会連合大会, No898 (1965).
- 5) 沢守 男, 他: 「真空しゃ断器」, 東芝レビュー, 21巻, p574 (1966).
- 6) 岩原浩一, 他: 「配電用真空開閉器」, 昭和42年電気学会 東京支部大会, No. 159 (1967).