

용량성 부하에 대한 차단기 투입제어 방식

이우영, 박경엽, 정진교, 김희진\*, 이봉희\*\*  
 한국전기연구원, \*(주)비츠로테크, \*\*한전 중앙교육원

Controlled Switching Method of Circuit Breaker for Capacitive Loads

W.Y.Lee, K.Y.Park, J.K.Chong, H.J.Kim\*, B.H.Lee\*\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute, \*Vitzrotech Ltd. Co., \*\*KEPCO

**Abstract** - In this paper the controlled closing algorithm to locate contact touch instants within the span in which the making voltage is minimized is proposed with the characteristics of circuit breakers such as RDDS(rate of decrease of dielectric strength) and a mechanical operating tolerance taken into account. The analytic results on the voltages across circuit breaker terminals upon closing operation play an important roles as references to describe the suggested method. Even though in the case of the isolated neutral capacitor banks, it is possible to decide the optimum contact instants without any dedicated procedures.

1. 서 론

전력계통의 효율적 운용을 위해 사용되는 조상설비와 무부하 변압기 등의 개폐동작 시에 발생하는 차단기 개폐 과도현상을 억제하기 위한 방안으로 현재 투입저항이나 리액터 그리고 피뢰기 등이 주로 사용되고 있다. 그러나 점차 이에 대한 대안으로 적절한 개폐시점의 설정으로 과도현상을 근원적으로 발생시키지 않게 하는 차단기 개폐제어방식의 도입이 많은 관심의 대상이 되고 있다[1]. 이러한 경향에는 차단기의 조작기 기술의 발전과 전자제어기술의 전력기기 적용에 대한 인식변화가 더욱 긍정적 영향을 더하고 있다. 개폐제어방식을 사용한 차단기의 현장적용 예는 90년대 초부터 지난 십여 년간 괄목할 만큼 성장해 온 것으로 보고 되고 있는데 그중에서 가장 활발한 적용대상이 콘덴서 뱅크의 투입 시 돌입전류를 제한하기 위한 목적으로 사용되고 있는 것으로 나타나고 있다[2]. 콘덴서 뱅크의 투입제어의 경우 적용 목적을 달성하기 위해서는 사용되는 차단기의 특성이나 제어결과의 오차정도 등에서 다른 적용대상들보다 더 엄격한 조건들이 요구되고 있다. 지금까지 발표된 관련 연구들은 단상이나 혹은 중성점이 접지된 삼상의 콘덴서 뱅크에 대하여 주로 다루어왔으며 중성점이 비 접지된 콘덴서 뱅크에 대해서는 아직 체계적인 결과가 제시되고 있지 않는 실정이다[3-6]. 더욱이 중성점 비 접지의 경우, 선행된 상 투입의 결과로 중성점의 전위가 변화되어 전극 간 전압이 인가된 전압과는 다르게 되어짐으로 동일한 극간 내전압 감소율 즉 RDDS (rate of decrease of dielectric strength)에 대하여 다른 선행방전 특성을 보이게 되며 결과적으로 제어결과에 좋지 않은 영향을 주기 때문에 이에 대한 고려가 요구되어진다[7]. 본 논문에서는 중성점이 비 접지된 콘덴서 뱅크의 구성에서 돌입전류 억제를 위한 차단기 각상의 투입시점을 투입 시 회로의 과도현상에 대한 해석적 방법을 통하여 선정하였다.

2. 투입제어시점 선정

차단기 투입제어의 해석을 위해 사용한 분로 콘덴서 뱅크의 적용회로는 그림 1과 같다. 각 상의 전원측 임피던스(Ls)를 통하여 wye 결선구조의 콘덴서 뱅크가 연결되어있고 그 사이에 개폐를 위한 차단기가 설치되어있다. 콘덴서 뱅크의 중성점의 조건은 스위치(SW)의 개폐상태에 따라 정해지며 스위치가 닫혀진 경우 단상의 경우와 동일해지기 때문에 여기서는 스위치가 열린 중성점 비 접지인 경우에 대하여 살펴보기로 한다.

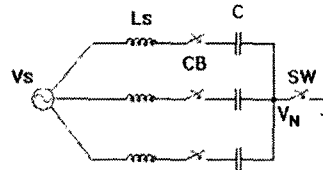
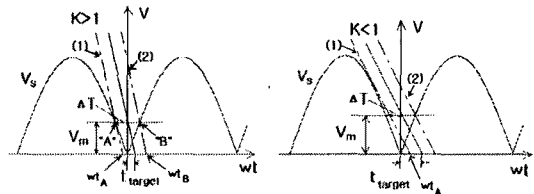


그림 1 분로 콘덴서 뱅크의 회로구성도

콘덴서 뱅크의 경우 투입 시 돌입전류를 억제하기 위해서는 차단기의 선행아크(pre-strike)특성이 고려된 상태에서 전류통전 시점이 차단기 극간전압 영점에 가능한 한 가까운 영역에서 일어나도록 해야 한다. 따라서 이때 고려되어야 할 사항으로는 전극 스트로크 시의 극간 내전압 감소율(RDDS)과 투입시간의 변화특성이 반드시 포함되어야 한다.

콘덴서 뱅크 투입에는 전류통전 개시 점의 전극 간 전압이 클수록 투입전류가 커지기 때문에 주어진 RDDS(=K)와 차단기 투입시간변화(ΔT)의 조건에서 투입전압(Vm)을 최소화하는 것이 개폐제어의 목표라 할 수 있다. 여기서는 차단기의 RDDS 값으로 정상상태 인가전압의 영점에서 기울기 값에 대하여 규준화 된 값을 사용하며 그 값이 1인 경우는 RDDS가 인가 전압의 영점에서 기울기와 동일함을 뜻한다. 모든 값의 K에 대하여 최적의 접점부착시점을 찾기 위해서는 K가 1을 기준으로 작은 영역과 큰 영역을 분리하여 해석하는 것이 필요하며 그림 2에는 이 두 경우에 대한 도식적 접근 방법을 나타내었다.



a) K>1인 경우      b) K<1인 경우  
 그림 2 차단기 RDDS(K)의 크기에 따른 접점부착시점의 영향

먼저 RDDS의 직선 식이 인가 전압파형과 한점에서만 교차하게 되는 K>1인 경우는 그림 2의 a)에서와 같이

$V_m$ 이 나타나게 되는 위치가 전압영점을 기준으로 대칭한 위치에 존재하게 된다. 그리고 동일한  $V_m$  값을 나타내게 되는 지점("A": $(-\omega\Delta T, V_m)$ , "B": $(\omega\Delta T, V_m)$ )을 지나는 두 직선 식 (1)과 (2)로부터 이들 직선들이 가로축과 만나는 시점들( $\omega t_A$ ,  $\omega t_B$ )을 구하게 되면 목표로 하는 접점투입시점( $t_{target}$ )은 이들의 평균값으로 표시되게 되며 이 과정에 사용되는 관계는 식 (1)-(4)와 같다.

$$\text{직선 (1)} : V = -K \cdot \omega t + (V_m - K\omega \cdot \Delta T) \rightarrow \omega t_A = \frac{V_m - K\omega \cdot \Delta T}{K} \quad (1)$$

$$\text{직선 (2)} : V = -K \cdot \omega t + (V_m + K\omega \cdot \Delta T) \rightarrow \omega t_B = \frac{V_m + K\omega \cdot \Delta T}{K} \quad (2)$$

$$\omega t_{target} = \frac{\omega t_A + \omega t_B}{2} = \frac{V_m}{K} \quad (3)$$

$$V_m = \sin(\omega \cdot \Delta T) \quad (4)$$

다음으로 그림 2 b)의  $K < 1$ 인 경우는 전압영점에서의 기울기보다 차단기의 RDDS가 작기 때문에 차단기 투입시간이 평균치보다 짧은 영역에서는 큰  $V_m$ 이 발생할 가능성이 존재하게 된다. 이 경우는 전압신호와 접하는 기울기  $K$ 인 직선 (1)이 시간 축과 만나는 점으로부터 차단기 투입시간 변화정도( $\Delta T$ )만큼 우편으로 이동된 시점이  $t_{target}$ 이 되는데 이 과정을 식으로 나타내면 식 (5)-(8)과 같다. 즉 그림 2 b)에서 RDDS가  $K$ 값인 직선이 인가전압신호와 접하게 되는 지점의 위상 값은 식 (5)과 같고 이로부터 식(6)과 같은 접선 식의 형태와 접점에서 전압 값으로부터 직선의 세로축 절편 값 (b)가 식 (7)으로 표시된다. 다음으로 이 직선이 가로축과 만나는 지점 즉 접점부착시점은 식 (8)와 같이 직선의 세로축 값이 영인 경우로부터 주어지게 되며 여기에 차단기의 투입시간 변화정도를 고려하면 제어목표지점이 주어지게 된다.

$$K = \cos \omega t \rightarrow \omega t = \cos^{-1} K \quad (5)$$

$$y = -K \cdot \omega t + b$$

$$\sin(\cos^{-1} K) = -K \cdot (-\cos^{-1} K) + b \quad (6)$$

$$b = \sin(\cos^{-1} K) - K \cdot \cos^{-1} K \quad (7)$$

$$\omega t = \frac{b}{K} = \frac{\sin(\cos^{-1} K) - K \cdot \cos^{-1} K}{K} \quad (8)$$

이러한 과정으로 주어지게 되는 접점부착 시점은  $K \geq 1$ 인 경우(RDDS가 인가전압의 영점에서 기울기보다 큰 경우)와  $K < 1$ 인 경우(RDDS가 인가전압의 영점에서 기울기보다 작은 경우)에 대하여 식 (9), (10)과 같이 각각 표현되어진다.

$$t_{target}(K, \Delta T) = \frac{\sin(\omega \cdot \Delta T)}{\omega K} \quad (9)$$

$$t_{target}(K, \Delta T) = \frac{\sin(\cos^{-1} K) - K \cdot \cos^{-1} K}{\omega K} + \Delta T \quad (10)$$

$K$ 가 "1" 보다 큰 경우는 차단기 동작시간의 흔들림이 없는 이상적인 경우 접점부착시점이 인가전압의 영점과 일치될 수 있지만 "1" 보다 작은 경우는 전극 스트로크 과정에서 선행아크가 발생되기 때문에 접점부착시점이 영점보다 늦어지게 됨을 알 수 있다. 그림 3은 식 (9)와 식 (10)으로부터 차단기의 RDDS와  $\Delta T$ 에 대한  $t_{target}$ 의 관계를 나타낸 것으로  $K$ 가 작아질수록 그리고 차단기 동작의 흔들림이 클수록 전압영점에서 멀어지게 되어 투입시의 전압(striking voltage)이 커지게 되고 투입전류 억제효과는 작아지게 됨을 보여준다. 따라서 돌입전류의 억제 효과를 높이기 위해서는 RDDS가 크고 투입 동작의 흔들림이 작은 차단기를 사용하는 것이 필

요하다.

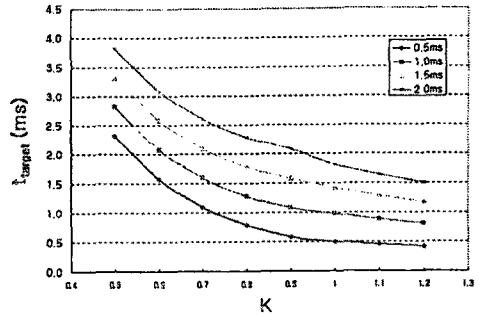


그림 3 차단기 특성(RDDS,  $\Delta T$ )에 따른 최적 접점부착시점 (전원주파수  $f=60\text{Hz}$ 인 경우)

그림 4는 앞서 주어진 접점부착시점( $t_{target}$ )이 개폐제어 방식으로 수행되는 콘텐서 뱅크의 전체 투입절차와 가지는 관계를 나타낸 것으로 개폐제어를 위한 지연시간  $T_d$ 는 식 (11)과 같이 된다.

$$T_d = (N \cdot T_{Ref} + t_{target}) - T_{closing} \quad (11)$$

여기서  $N$ 은 지연시간  $T_d$ 가 양의 값을 가지는 최소 자연수를,  $T_{Ref}$ 는 입력신호의 반주기율 그리고  $T_{closing}$ 은 차단기의 투입시간을 나타내며  $T_w$ 는 임의의 투입명령시점( $t_{command}$ )에서부터 첫 번째로 만나는 입력신호 영점까지의 시간을 뜻한다.

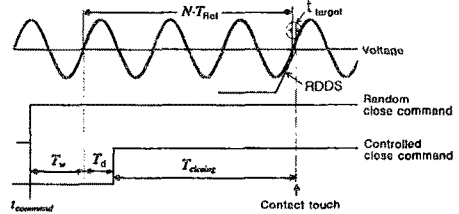


그림 4 콘텐서 뱅크의 투입 절차도

지금까지는 주어진 인가전압에 대하여 투입 시점 접점부착시점을 설정하는 방법에 대하여 살펴보았으며 콘텐서 뱅크의 중성점이 접지된 경우에 각 상이 상호간섭 없이 독립적이기 때문에 각 상에 동일하게 적용할 수 있다. 그러나 중성점이 비 접지된 삼상의 콘텐서 뱅크 투입 시에는 각상의 상관관계로 인하여 선행 투입된 상의 영향에 따른 전압 크기와 침투치 시점의 변화가 고려되어야 한다. 그림 5는 중성점 비 접지 상태에서의 차단기 투입 시 발생하는 전극 간 전압형태의 한 예를 나타낸 것으로 중성점 전위가 먼저 투입된 상의 영향으로 인해 전압 침투치 값과 그 위치가 변경되어지게 됨을 보여준다. 즉 전극양단에 인가되는 전압의 크기는 차단기의 RDDS와 연관되어 투입전압의 크기에 영향을 미치게 되므로 전극부착시점 제어를 위해서는 투입 시 일어나는 현상에 대한 충분한 이해가 필요하게 된다. 먼저 첫 번째로 동작하는 상에 대해서는 차단기 전극 간에 정격전압이 인가된 상태에서 투입되기 때문에 단상의 경우와 동일하고 또 중성점 비접지인 경우 전극을 통해 흐르는 전류는 아직 없는 상태이므로 투입전류의 크기가 투입시점에 영향을 받지 않는다. 다음으로 두 번째 투입상의 전극 간 인가전압( $V_{CB2}$ )은 첫 번째 상의 투입으로 인한 중성점의 전위변위와 두 번째 상에 인가되는 전압의 차이로 식 (12)와 같이 표현되어지며 인가전압의 크기  $V_{CB1,MAX}$ 은 1을 기준으로 하였다.

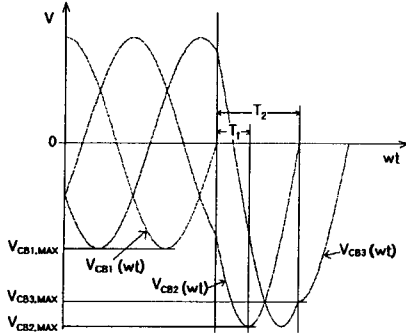


그림 5 중성점 비접지 상태의 콘덴서 뱅크 투입 시 차단기 극간 전압형태

$$V_{CB2}(wt) = \sin(wt - \frac{2}{3}\pi) - \sin wt$$

$$= -\frac{3}{2}\sin wt - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos wt \quad (12)$$

그리고 극간 전압의 최대치 시점은  $\frac{\partial V_{CB2}}{\partial wt} = 0$ 를 만족하는 시점으로 첫 번째 상의 전압영점을 기준으로 하면 식 (13)과 같이 주어지게 된다.

$$\frac{\partial V_{CB2}}{\partial wt} = -\frac{3}{2}\cos wt + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin wt = 0 \rightarrow wt = \frac{\pi}{3} \quad (13)$$

또한 극간의 첨두치 전압크기는 식 (13)에 주어진 시점에서의  $V_{CB2}$ 의 값으로 인가전압의 최대치( $V_{CB1,MAX}$ )에 대하여 식 (14)와 같이 나타낸다.

$$V_{CB2,MAX} = \sqrt{3} V_S \quad (14)$$

두 번째 상이 투입된 상태에서 중성점의 전위( $V_N$ )는 식 (15)와 같이 첫 번째 인가 상과 두 번째 인가 상의 평균값으로 주어지게 된다.

$$V_N(wt) = \frac{1}{2}(\sin wt + \sin(wt - \frac{2}{3}\pi))$$

$$= \frac{1}{4}(\sin wt - \sqrt{3}\cos wt) \quad (15)$$

따라서 마지막 투입상의 전극 간 인가전압( $V_{CB3}$ )은 이 중성점의 전위와 마지막 상에 인가된 전압과의 차이로 식 (16)과 같이 나타나게 된다.

$$V_{CB3}(wt) = \sin(wt + \frac{2}{3}\pi) - V_N$$

$$= \frac{3}{4}(\sqrt{3}\cos wt - \sin wt) \quad (16)$$

이로부터 마지막 상의 최대치 시점은  $\frac{\partial V_{CB3}}{\partial wt} = 0$ 를 만족하는 시점으로 첫 번째 상의 전압영점을 기준으로 하면 식 (17)과 같이 된다.

$$\frac{\partial V_{CB3}}{\partial wt} = -\frac{3}{4}(\sqrt{3}\sin wt - \cos wt) = 0$$

$$\rightarrow wt = \frac{5\pi}{6} \quad (17)$$

또 최대치 전압크기는 인가전압의 최대치에 대하여 식 (18)와 같다.

$$V_{CB3,MAX} = \frac{3}{2} V_S \quad (18)$$

이상에서 살펴본 차단기 상간 영향에 따른 극간 전압 및 첨두치의 시점은 표 1과 같이 요약되어질 수 있다.

표 1 상간 영향에 따른 극간 전압 및 위상 (첫 번째 상 기준)

	첨두전압 크기	첨두치 지점
두 번째 상	$V_{CB2,MAX} = \sqrt{3} V_{CB1,MAX}$	$T_1 = 1/3\pi$
세 번째 상	$V_{CB3,MAX} = 3/2 V_{CB1,MAX}$	$T_2 = 5/6\pi$

결과적으로 차단기의 각 상별 접점부착 목표시점 ( $t_{target}$ )은 첫 번째 상의 전압영점을 기준으로 식 (19)-(21)와 같이 주어지며 이 식들에서  $K_{1,2,3}$ 는 각상 전극간에 인가된 전압( $V_{CB1}$ ,  $V_{CB2}$ ,  $V_{CB3}$ )의 영점에서 기율기에 대한 차단기 RDDS의 표준화 값을,  $\Delta T$ 는 차단기의 투입동작 시간의 변화분을,  $T$ 는 인가전압의 주기를 나타낸다.

$$\text{첫 번째 상(R): } t_{target}^R = t_{target}(K_1, \Delta T),$$

$$K_1 = \frac{RDDS}{w V_{CB1,MAX}} \quad (19)$$

$$\text{두 번째 상(S): } t_{target}^S = t_{target}(K_2, \Delta T) + \frac{5}{12} T,$$

$$K_2 = \frac{RDDS}{w V_{CB2,MAX}} \quad (20)$$

$$\text{마지막 상(T): } t_{target}^T = t_{target}(K_3, \Delta T) + \frac{2}{3} T,$$

$$K_3 = \frac{RDDS}{w V_{CB3,MAX}} \quad (21)$$

### 3. 결 론

본 논문에서는 콘덴서 뱅크의 투입전류 억제를 위한 투입제어 시점의 선정방안에 대하여 제안하였다. 투입시점 선정에는 차단기 RDDS의 크기에 따라 1의 값을 기준하여 두 영역으로 구분하여 수행함으로 RDDS가 낮은 경우 높은 투입전압이 발생할 수 있는 가능성을 방지하였으며 한 상의 기준입력신호로 삼상의 제어시점이 설정될 수 있도록 중성점 비접지 구성의 상간 관계가 고려되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] H.Ito, "Controlled switching technologies, State-of-the-Art," IEEE/PES Trans-mission and Distribution Conference Proceedings, Vol.2, pp. 1455-1460, Oct. 2002.
- [2] H.Tsutada, T.Hirai, H.Kohyama, H.Ito, and K.Sasaki, "Development of synchronous switching controller for gas circuit breaker," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference Proceedings, Vol.2, pp. 807-812, Oct. 2002.
- [3] Task Force 13.00, "Controlled switching - A state-of-the-art survey(part I)," ELECTRA, No.162, pp 65-96, October 1995
- [4] Task Force 13.00, "Controlled switching - A state-of-the-art survey(part II)," ELECTRA, No.164, pp 40-61, February 1996
- [5] Working Group 13.07, "Controlled switching of HVAC CBs guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (1st Part)," ELECTRA, No.183, pp 43-73, April 1999
- [6] Working Group 13.07, "Controlled switching of HVAC CBs guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (2nd Part)," ELECTRA, No.185, pp 37-57, August 1999
- [7] H.Hamada, A.Eto, T.Maekawa, etc., "RDDS(Rate of Decrease of Dielectric Strength) Measurement for Gas Circuit Breaker," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference Proceedings, Vol.3, pp. 1755-1759, Oct. 2002.