

Magnetic Switching을 이용한 직류회로 순간전류제한기

- 기초원리 및 회로해석 -

지근양*, 정성훈*, 이수원**, 장봉환***, 문영현*
연세대학교*, 성균관대학교**, 국제전기(주)***

Instant current limiter using a magnetic switching for DC circuit

- Basic principles and circuit analysis -

Geun-Yang Ji*, Sung-Hun Jung*, Soo-Won Lee**, Bong-Hwan Jang***, Young-Hyun Moon*
Yonsei University*, Sungkyunkwan University**, International Electric Co.Ltd***

Abstract - 본 논문에서는 직류 전력계통에서 고장발생 시 인덕턴스의 변화를 이용한 순간 전류제한기를 제안하였다. 직류계통에서는 영점교차(Zero Crossing)가 없어 고장전류 차단이 매우 어렵다. 제안된 회로에서는 고장전류를 open하여 고장전류를 용이하게 차단할 수 있다. 기존 직류차단방식은 dI/dt 를 사용하여 빠른 시간에 고장여부를 판단하고 고장전류가 커지기 전에 신속 차단하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 dI/dt 에 의한 빠른 고장판단은 그만큼 불확실성이 커 오동작의 원인이 되기도 한다. 본 논문에서 제안한 시스템에서는 고장전류가 충분히 증가된 후에도 이를 감소시켜 차단할 수 있으므로 고장판단에 충분한 시간을 확보할 수 있어 차단용량을 줄일 수 있고 고장차단 안전성을 향상시킬 수 있다. 또한 제안된 시스템은 교류시스템에 대한 한류기로 활용될 수 있어 장차 활용범위가 매우 크다.

1. 서 론

직류 전력계통은 직류 전기철도 및 산업계 직류전원 설비 등에 적용되고 있으며 이 중에서 현재 널리 보급된 기존의 직류 차단기는 전원장치, 전동차 및 배터리 충전기 등에 주로 사용되고 있다. 이러한 직류 차단기의 차단방식은 전류 크기뿐만 아니라 dI/dt 를 함께 사용하여 빠른 시간(0.01초 이내)에 고장여부를 판단하고 고장전류가 커지기 전에 신속 차단하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 dI/dt 에 의한 빠른 고장판단은 그만큼 불확실성이 커 간혹 갑작스런 부하변동을 고장으로 오판하여 차단기 오동작의 원인이 되기도 한다. 또한 기존 직류차단기에서는 신속한 고장 판단뿐만 아니라 신속한 고장차단(0.01초 이내)도 매우 중요하므로 차단 메카니즘에 고속액츄에이터를 사용하고 있고 이에 따라 차단용량이 커지면 차단기 단가가 매우 고가가 된다. 따라서 단락용량이 큰 직류계통에서 한류기를 사용하면 차단기 비용을 크게 줄일 수 있다. 또한 전력계통이 점차 대용량화되고 있고 이에 따른 차단용량증가는 피할 수 없으므로 차단 설비투자예산 절감효과도 얻을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 직류 전력계통에서 고장이 발생하였을 경우 고장발생 인지 즉시 순간 전류제한기의 가동철심부가 권선이 감긴 고정철심부에 결합하는 Magnetic Switching을 통한 인덕턴스의 변화를 이용하여 순간적으로 역기전력을 발생함으로써 고장전류를 감소시키고 그 순간 직류 차단기를 open하여 고장전류를 용이하게 차단함으로써 적은 용량의 차단기로도 차단성능을 확보할 수 있고 설비투자예산도 절감할 수 있는 신뢰성 있는 시스템을 제안하였다.

제안된 시스템은 교류에도 적용 가능하며 기후협약에 따른 SF6가스 사용금지에 따라 차단기 관련 기술의 혁신이 요구되고 현지점에서 단락용량 문제 해결 방안으로 검토해 볼만한 충분한 가치가 있다고 생각된다.

2. 본 론

2.1 Magnetic Switching 이론

인덕턴스의 변화를 이용한 Magnetic Switching은 일정 시간 동안 자속이 변화하는 공간에 도체가 있을 경우 전압과 전류가 유기되는 원리를 응용한 것으로 인덕턴스의 coupling을 포함한 자기회로는 인덕턴스의 접속방법에 따라 자속방향이 같은 가동결합과 자속방향이 반대인 차동결합이 있다 이에 대한 회로는 그림 1과 같다.

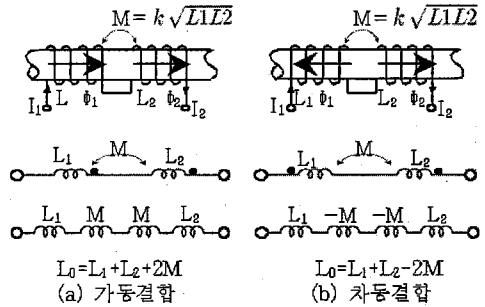


그림 1. 인덕턴스 접속방법에 따른 자기회로

그림 1(a)는 인덕턴스를 직렬로 연결한 회로이며 누설 자속을 무시하면 coupling 계수 k 가 1의 값을 갖게 되며, 반면에 그림 1(b)는 coupling 계수 k 가 -1의 값을 갖게 된다. 예를 들어 $k = 1$ 인 가동결합인 경우 회로의 전체 인덕턴스 $L_0 = L_1 + L_2 + 2M$ 이 되고, $k = -1$ 인 차동결합인 경우이면 $L_0 = L_1 + L_2 - 2M$ 이 되며, $k = 0$ 이면 $L_0 = L_1 + L_2$ 가 된다.

따라서 coupling 계수 k 를 바꿔줄 수 있는 Magnetic Switching 회로를 고안하면 인덕턴스의 변화를 이용한 직류회로에서의 전류변화를 확인할 수 있다.

2.2 Magnet Switching을 이용한 직류회로 시스템 구성

아래의 그림 2와 같이 Magnetic Switching을 이용하여 인덕턴스의 변화가 가능한 직류회로 해석을 위한 시스템을 구성하였다. 이 시스템은 회로에 전원을 공급하는 직류전원과 동일권선, 동일 turn수로 권선이 감겨져 있는 고정철심부 상·하 및 고정철심부 사이에 위치하면서 순간적으로 자속의 변화를 발생하여 회로전체의 인덕턴스를 변화시켜 주는 가동철심부로 구성되어 있다.

고정철심부 구조와 상하에 감겨져 있는 권선은 다음 조건을 만족하도록 설계되어 있다.

철심부

- i) 철심부는 고정철심부와 가동철심부로 되어 있으며, 고정철심부에만 권선을 한다.
- ii) 가동철심부(가운데 부분)는 정상시에는 고정철심부와 직각을 이루는 위치에 고정시켜 두며, 고장차단 시에는 90° 회전시켜 고정철심부 전극 사이로 투입된다.

권선부

- i) 고정철심부에서 서로 마주하고 있는 전극은 같은 자극이 되도록 권선이 감겨져 있다.
- ii) 권선사이의 연결 방법은 직렬, 병렬 등 여러가지 방법이 있으나 i)의 조건만 만족시키면 된다. (아래 회로에서는 병렬 연결 방식을 취하고 있음.)

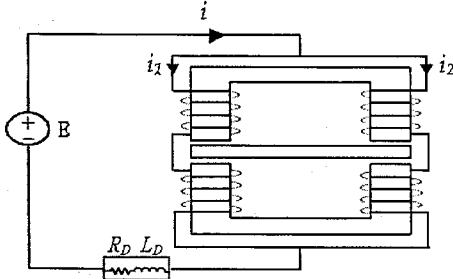


그림 2. Magnetic Switching 을 이용한 직류회로 시스템

가동철심부가 고정철심부에 결합되기 전에는 상부 고정철심부에서 발생한 자속과 하부 고정철심부에서 발생한 자속이 서로 반대방향으로 발생하므로 서로 상쇄되어 회로내의 총 자속은 0 이 된다. 따라서 회로는 인덕턴스의 변화를 발생시키지 않고 또한 권선의 양단에 전압강하도 발생하지 않게 된다.

가동철심부가 상부 고정철심부와 하부 고정철심부 사이에 결합하게 되면 상부 고정철심부에서 발생한 자속과 하부 고정철심부에서 발생한 자속이 가동철심부를 통하여 흐르게 되고 순간적으로 급격히 증가하는 자속은 고정철심부에 감긴 권선에 역기전력을 발생시키게 된다. 이 때 발생한 순간적인 역기전력은 회로에 흐르는 전류의 크기를 순간적으로 감소시키게 된다. 이에 대한 등가회로는 아래 그림과 같다.

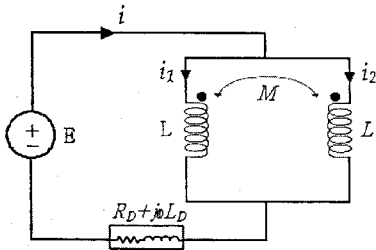


그림 3. Magnetic Switching 을 이용한 직류 등가회로

2.3 Magnet Switching시 전류의 변화

가동철심부가 상·하 고정철심부 사이에 결합하는 순간의 전류의 변화를 알아보기 위하여 회로에 키르히호프의 전압법칙(KVL)을 적용하면,

$$E = \frac{d(Li_1)}{dt} + \frac{d(Mi_2)}{dt} + R_D i + L_D \frac{di}{dt} \quad (i_1=i_2=\frac{1}{2}i)$$

$$\therefore E = \frac{1}{2} \left(\frac{d(Li)}{dt} + \frac{d(Mi)}{dt} \right) + R_D i + L_D \frac{di}{dt}$$

$$\int_0^+ E dt = \int_0^+ \left[\frac{1}{2} (L \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}) + R_D i + L_D \frac{di}{dt} \right] dt$$

$$0 = \frac{1}{2} [L(O^+)i(O^+) + M(O^+)i(O^+)] - \frac{1}{2} [L(O)i(O) + M(O)i(O)] + R_D \int_0^+ i dt + L_D [i(O^+) - i(O)] \quad (1)$$

여기서 누설자속 등을 감안하여 가동철심 투입 전후의 회로정수를 다음과 같이 가정하면,

$$L(O^+) = L, \quad L(O) = L$$

$$M(O^+) = 0.1L, \quad M(O) = -0.7L \quad (2)$$

식(1)로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$0 = \frac{1}{2} [L(i(O^+) - i(O)) + 0.1L i(O^+) + 0.7i(O)] + L_D [i(O^+) - i(O)] \quad (3)$$

위식을 정리하여 $i(O^+)$ 를 계산하면

$$i(O^+) = \frac{0.15L + L_D}{0.55L + L_D} i(O) \quad (4)$$

여기서 $\alpha = \frac{L_D}{L}$ 라고 정의하면 가동철심부 투입 전·후의 전류비는 다음과 같이 주어진다.

$$i(O^+)/i(O) = \frac{0.15 + \alpha}{0.55 + \alpha} i(O) \quad (5)$$

α 값의 변화에 따른 전류의 변화를 살펴보기 위하여 위식에 대한 계산 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. $\alpha = \frac{L_D}{L}$ 의 변화에 따른 전류 감소율

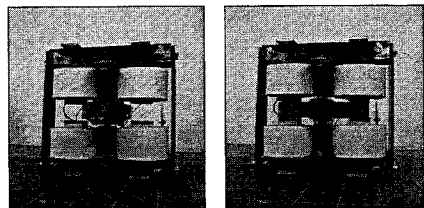
α	0.5	0.3	0.2	0.1	0
$i(O^+)/i(O)$	0.619	0.529	0.467	0.385	0.273

2.4 실험 및 결과

본 논문에서는 Magnetic Switching 시 전류의 변화를 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 실험시 사용한 시스템 파라미터는 표2와 같고 그림 4는 Magnetic Switching 시 가동철심부가 고정철심부에 결합되기 전과 후의 모습이다.

표2. System Parameter

Parameter	Value
DC source	30 V
R_{load}	1 Ω
R_{ms}	0.3 Ω
L_{before}	17 mH
L_{after}	62.6 mH



(a) 결합 전 (b) 결합 후

그림 4. Magnetic Switching시 가동철심부의 결합 전·후

2.4.1 가동철심부 결합후의 회로 전류의 변화

Magnetic Switching시 가동철심부를 결합한 후의 전류의 변화를 확인하기 위하여, 그림 4(a)의 결합 전 상태에서 그림 4(b)와 같이 가동철심부를 결합하고 난 후의 전류를 측정하고 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

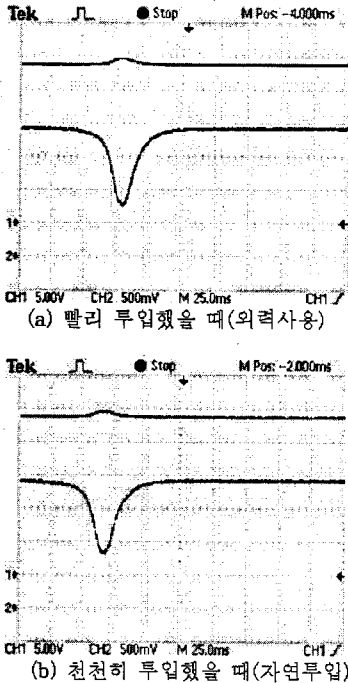


그림 5. Magnetic Switching시의 전압, 전류 파형
(상: 입력전압, 하: 전류)

그림 5에서 알 수 있듯이 전원전압 직류 25V의 회로에서 정상적인 상태의 전류는 약 19A이지만 Magnetic Switching이 일어날 때의 전류는 순간적으로 약 30 ~ 50ms 동안 크게 감소하여 약 8A 정도 즉, 정상상태의 전류보다 약 58% 정도 감소한 것을 알 수 있다.

2.4.2 실험결과

제안된 순간전류제한기에서는 가동철심 투입 전후의 인덕턴스 비가 크면 클수록 전류제한효과는 더 커진다. 본 실험에서는 제작상 초기 누설자속을 충분히 줄일 수 없었고 또한 가동철심 투입 후의 인덕턴스가 역시 충분히 크게 할 수 없었던 것이 아쉬운 점이었다. 그러나 직류회로에서 Magnetic Switching을 이용한 자속의 변화 및 인덕턴스의 변화를 이용하여 전류의 감소를 확인 할 수 있었고 그 결과 직류전력계통에서 고장전류 발생 시 이를 적용하면 고장전류를 크게 줄일 수 있음을 또한 확인할 수 있었다. 일정한 투입 속도 이상에서는 가동철심을 빨리 투입한 경우나 천천히 투입한 경우나 전류감소 비율은 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 확인 할 수 있었고 이것은 특이회로(Singular Circuit)에 관한 상기 이론분석이 유효함을 보여 주는 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 최근 국제적으로 환경문제가 가장 중요한 이슈가 되고 있는 가운데 전력계통에서도 친환경적인 전력설비가 도입이 검토되고 있고 또한 일부 설비에 대하여 시험사용이 되고 있는 점을 감안하여 환경오염을

줄이고 뛰어난 성능을 유지하는 전력설비 개발이라는 점을 목적으로 두고 진행하였다.

특히 전류 차단을 목적으로 하는 차단기는 대부분 SF6 가스를 절연물질로 사용하고 있는데, 이는 1997년 교토 기후변화 협약시 온실가스로 지정이 되어 의무감축 온실가스 대상이다. 따라서 본 논문에서 다루고 있는 Magnet Switching을 이용하면 직류전력계통에서 고장전류가 발생하였을 경우 고장전류를 순간적으로 감소시키고 이 때 차단기를 동작시키면 적은 용량의 차단기로도 효율적으로 고장전류를 차단할 수 있을 뿐만 아니라 이에 따른 온실가스 감축효과를 거둘 수 있으므로 향후 전력계통에서 크게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서 진행한 실험은 직류전력계통을 대상으로 하였지만 직류 전기철도나 산업계 직류 전원설비 등을 제외한 대부분의 전력설비는 교류 전력계통으로서 향후 초고압전력계통에 사용될 수 있는 차단기 개발을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

다만 실험시 누설자속과 가동철심부를 고정철심부에 결합하는 순간의 오차 등으로 인한 부정확성은 앞으로 계속 연구하여 개선해야 할 사항이며 본 논문에서 제안하는 사항은 고장발생시 고장전류를 직접 차단하지 않고 고장전류 인지와 동시에 인덕턴스를 변화시켜 고장전류를 감소시키고 그 순간에 차단기를 동작시키는 것으로서 차단기에 가해지는 아크충격을 크게 감소시켜 설비의 수명을 연장함은 물론 적은 용량의 차단기로도 큰 고장전류 차단이 가능하므로 예산절감의 효과도 거둘 수 있는 장점을 가지고 있다.

또한 본 논문에서 제안한 시스템은 직류 전력계통에서 사용되는 모든 직류차단기의 사용분야에 활용될 수 있으므로 파급효과가 매우 클 것으로 판단되며 차단기의 신뢰성 및 안정성 향상에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

[참 고 문헌]

- [1] 심동연, "전력용 사이리스터 MCT를 이용한 무접점 직류차단기", 한국동력기계공학회지, 제4권제1호, pp.45-50, 2002.
- [2] 민병훈, "직류고속도차단기의 소전류 차단 특성연구", 대한전기학회, Vol.55B, pp.396-401, 2006.
- [3] C.H.Flurscheim, "Power circuit breaker theory and design", pp.189-234, 1982.
- [4] "Low-voltage DC power circuit breakers used in enclosures", IEEE Std C37.14, pp.18, 1999.
- [5] "Rules for electric traction equipments", IEC77, pp36-37, 1968.