

HVDC 전력변환기의 Commutation 동작분석

*곽주식, 우정욱, 고봉연, 김찬기, 심응보
한국전력공사 전력연구원

Analysis of HVDC Converter Commutation Process

*J.S.kwak, W.J.Wook, B.E.Koh, C.K. Kim, E.B. Shim
Korea Electric Power Research Institute of KEPCO

Abstract - Commutation failure can be considered as the severest abnormal operation of thyristor HVDC converter. During the failure, power conversion from DC to AC is stopped until the AC voltage get recovered. The process of thyristor converter is subscribed at normal and abnormal state, respectively. The detection and the protection for Cheju HVDC are explained by computer simulation results.

압은 다음과 같다. 그림 1에서와 같이 직류전압은 교류 전압이 일정하다고 하면 점화각 α 의 함수로서 그 크기와 극성이 결정되어진다. 이 경우 밸브에 흐르는 전류는 턴온/턴 오프 동작과 함께 시간 지연 없이 전류의 크기가 변하게 된다.

$$V_{dc, avg}(\alpha) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{Lrms} \cos \alpha \quad (1)$$

1. 서 론

싸이리스터는 지난 30여 년간 직류송전설비(HVDC)의 전력변환소자로 사용되어 오고 있다. 싸이리스터를 이용하는 자연 전류방식의 변환기는 스스로 소호 할 수 있는 능력이 없기 때문에 외부의 轉流 전원이거나 별도의 소호 회로를 반드시 필요로 한다. 싸이리스터 변환기가 인버팅 모드로 동작 할 경우 소호각은 최소값 근처에서 운전되나 인버터 교류계통의 외란이 발생하게 되면 최소값 이하로 감소하게 되어 전력변환동작이 정지하게 되는 상황으로 진전될 수 있다. 이와 같은 일시적인 전류실패(COMMUTATION FAIL)는 교류 전압이 정상으로 회복되면 제거될 수 있으나 지속시간이 길어질 경우 설비의 정지로 이어지게 된다. 이는 과전류로부터 싸이리스터 소자를 보호하기 위한 동작이 취해지기 때문으로 싸이리스터 변환기 동작에 가장 심각한 영향을 끼치는 사항으로 간주된다.

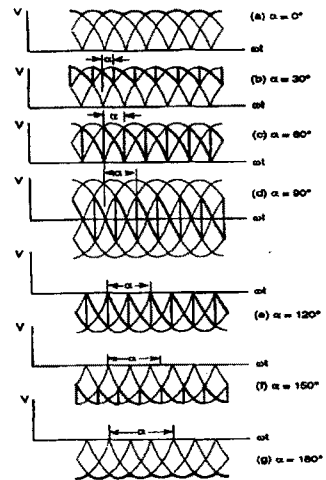


그림 1. 점화각(α) 변화에 따른 브릿지 전압의 변화

본 논문에서는 직류전류, 직류전압, 교류전압, 변압기 리액턴스에 의하여 영향을 받게 되는 정상 및 비정상적인 COMMUTATION 동작을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보고 제주-해남 직류송전설비의 COMMUTATION-ON FAIL의 검출 및 보호동작 원리를 소개한다.

2. 본 론

2.1 Commutation

HVDC 전력변환기의 정류나 인버팅 동작은 "Line Commutation" 혹은 "Natural Commutation" 과정이라 하는 것에 의하여 이루어진다. 싸이리스터는 스위치로 동작하여 AC 전압이 순차적으로 on/off되어 직류전압을 공급하도록 한다. 각 싸이리스터가 turn-on하게 되면 전류가 흐르기 시작하고 하나의 밸브는 전류가 0으로 감소하면서 turn-off 하게되며 6펄스변환기의 경우 이러한 동작이 120도 간격으로 순차적으로 일어나게 된다. "Commutation"이라 함은 두 개의 싸이리스터가 동시에 turn-on/turn-off 하면서 하나의 싸이리스터에서 다른 싸이리스터로 전류가 옮겨가는 현상을 말한다.^[3] 이러한 commutation은 인가되는 삼상 전압순서에 따라 a상 → b상 → C상 → a상으로 순환하여 일어난다.

가. 전원측 임피던스가 없는(L = 0) 경우

교류 전원 측에 인덕턴스가 없는 경우의 직류 평균 전

나. 전원측 임피던스가 존재하는(L ≠ 0) 경우

실제의 경우 변환기는 변압기를 통하여 교류전원계통과 연결되어 있으며 교류 전원측으로 바라본 테브난 등가 임피던스가 존재하게 되며 대부분은 변압기의 누설 임피던스로서 존재한다. 식(2)에서 commutating reactance Xc는 직류전압강하를 일으키는 저항성분처럼 작용한다. 변환기가 인버팅모드로 동작한다면, $\alpha + \gamma + \mu = 180^\circ$ 의 조건에서 직류전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[1]

$$V_{dc}(\alpha, I_{dc}) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{Lrms} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_c I_{dc} \quad (2)$$

$$V_{dc, avg}(\gamma, I_{dc}) = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{Lrms} \cos \gamma + \frac{3}{\pi} X_c I_{dc} \quad (3)$$

commutation은 Xc와 전류의 크기 전압의 크기에 의해서 결정되는 유한한 시간동안 이루어지게 된다.

$$\mu = \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} I_{dc} X_c}{V_{Lrms}} \right) - \alpha \quad (4)$$

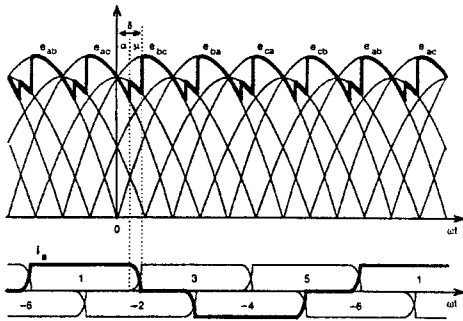


그림 2. 싸이리스터 변환기 직류전압, 교류 전류

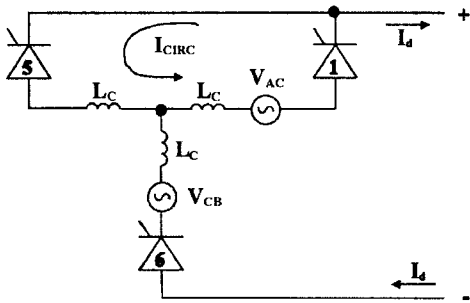


그림 3 변압기 인덕턴스(Lc)가 있는 회로에서 밸브5로부터 밸브1로 전류의 轉流

2.2 전류실패 검출과 변환기 보호

변환기가 인버터모드로 동작할 때 싸이리스터 애노드에서 캐소드로 정방향의 전류가 흐른다고 가정할 때 음의 교류 전압이 인가되는 조건에 있다. 다음 도통주기에 도달한 싸이리스터에 점호신호가 인가되어 턴 온 하면 전류는 0으로 감소하여 turn-off 상태에 이르게 되며 역방향 지지상태에 (reverse blocking) 있게 된다. 시간이 진행되어 밸브양단의 전압의 음의 주기가 양의 반주기로 전압극성이 바뀌게 되면 정방향 지지 상태에서 다음번 점호신호가 인가 될 때까지 오프상태를 유지하게 된다. 싸이리스터가 도통상태에서 오프상태로 천이 할 때 내부 PN접합면사이의 충전된 캐리어가 원래의 상태로 복귀되어야만 완전한 오프상태로 유지될 수 있다. 도통상태에서 비도통 상태로 천이 하는데 소요되는 시간을 싸이리스터의 턴 오프 시간 t_{off} 이라 한다. 소호각 $\gamma = \pi - (\alpha + \mu)$ 은 싸이리스터의 turn-off 시간보다는 길어야 한다. 그렇지 않을 경우 소호 되어야 할 싸이리스터는 $\omega t = \pi$ 에서 정극성의 교류 전압에 의하여 정방향 지지 (forward block) 상태에 있지 못하고 재도통하게 된다. 이때 교류전압극성은 바뀌었으나 전류방향은 그대로 유지되어 인버터는 정류모드로 동작하는 전류실패 (commutation failure)가 일어난다. 전류실패가 일어나면 인버터의 직류전압극성이 $- \Rightarrow +$ 바뀌게 되므로 큰 전류가 흐르게 되고 직류전류가 교류전류보다 크게 나타나게 되므로 이러한 현상에서 전류실패발생을 검출 할 수 있다. 전류실패가 일어나면 DC에서 AC로의 전력변환이 이루어지지 않게 된다. 정상운전상태에서 변환기로 흘러들어오는 교류전류와 흘러나가는 직류 전류의 크기는 동일하며 그림 5와 11에서 확인할 수 있듯이 항상 식(5)의 관계를 만족한다.

Commutation이 발생하게 되면 전류의 직류전류의 크기가 교류전류보다 커지는 현상이 발생한다. 일반적으로 전력변환기는 일시적인 전류실패에 견디도록 설계되

며 교류 전원이 수십-수백 msec이내에 정상으로 회복되면 제거된다. 그러나 열 용량을 넘어서는 과전류가 흐르게 되면 싸이리스터가 소손 될 수 있기 때문에 이로부터 싸이리스터를 보호할 필요가 있다.

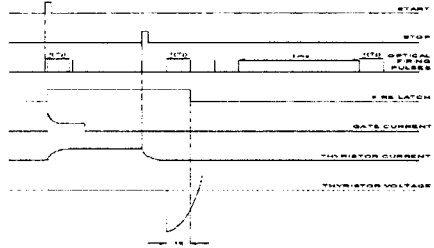


그림 4 사이리스터의 γ , 전압, 전류 파형

$$2I_{dc} = |I_a| + |I_b| + |I_c| \quad (5)$$

$$2I_{dc} > |I_a| + |I_b| + |I_c| \quad (6)$$

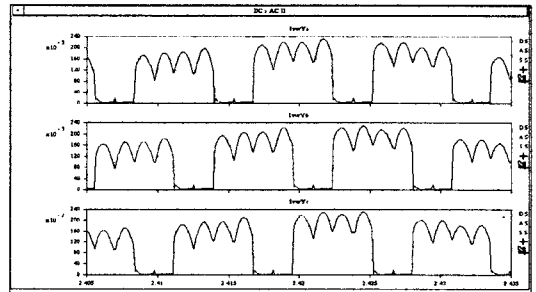


그림 5 Y-Y 결선 변압기의 2차 3상의 교류 전류

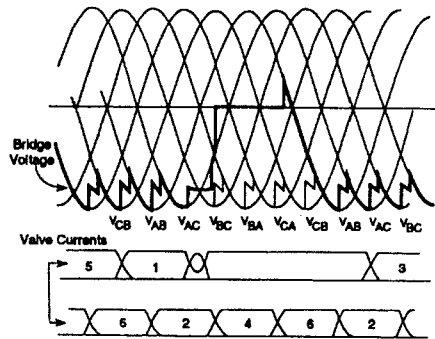


그림 6 전류실패시의 싸이리스터 전압과 전류

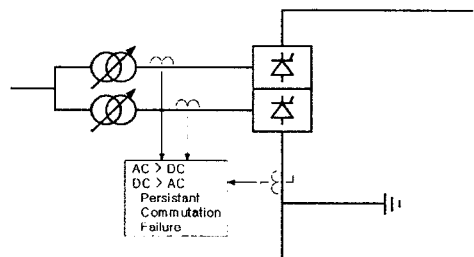


그림 7 DC/AC 차동전류 검출

전류, 전압, commutation reactance의 크기에 따라 변화하기 때문에 轉流 증폭각 μ 는 특정한 값으로 결정될

수 없다. 따라서 동작의 신뢰성을 확보하기 위해서 소호각이 허용 값 이하로 내려가지 않도록 제어가 동작하게 되며 인버터의 점호각을 조절함으로써 소호각을 유지하게 된다. 통상적으로 15° - 30° (약 1msec)의 소호각이 적용된다. 이 값에 대하여 안전율(safety margin)을 크게 하면 AC 계통의 파형 왜곡 및 변동에 대하여 인버터의 신뢰성 있는 동작을 보장하나 역률이 나빠지게 되고 무효 전력 요구량이 증가하게 되므로 사이리스터의 정격을 증가시키게 된다. 인버팅 동작시 점호각 α 의 최대값은 중복각과 최소 소호각(γ_{min})에 의해 제한된다.

$$\alpha_{max} \leq \pi - (\mu + \gamma_{min}) \quad (7)$$

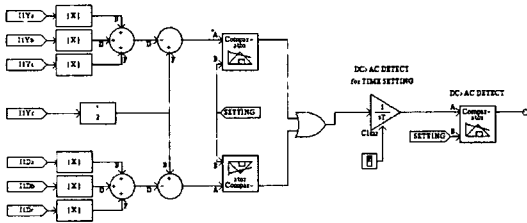


그림 8 DC > AC Detection & Protection

HVDC 시스템은 Y-Y 결선, Y-Delta 결선의 12 펄스 변환기로 구성된다. 각 6펄스 변환 브릿지로부터 삼상 교류 전류와 직류전류를 검출하여 그 크기를 비교한다. 식(5)에 의한 평형이 깨지게 되면 Commutation Fail 발생 신호가 생성되고 이렇게 생성된 발생신호는 적분회로를 통하여 발생지속시간을 측정하게 된다. DC > AC 신호가 설정시간(제주-해남의 경우 약 1초)이상 지속되면 적분출력이 Trip Level을 넘어서는 순간 보호회로에 신호를 전송하여 밸브 점호신호를 차단하고 변압기의 차단기를 개방하도록 한다. 그러나 DC > AC 발생신호가 설정시간 이내에 소멸하여 시스템이 정상으로 회복하면 시간 설정회로의 적분기는 초기화된다. 그림 9에서 Commutation Fail이 발생하면 직류전류가 AC 전류보다 급격히 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이 때 직류전압은 0으로 감소하며 시스템의 전류제어기는 직류전류를 정격 이내로 제어하기 위한 조치를 강구하게 된다. 인버터계통의 전압이 회복되지 않아 설정시간이상 고장이 지속되면 그림 12의 Trip 신호가 보호회로에 전달되게 된다.

3. 결 론

일시적인 전류실패(COMMUTATION FAIL)는 교류 전압이 정상으로 회복되면 사라지게되나 지속시간이 길어질 경우 설비의 정지로 이어지게 된다. 이는 과전류로부터 사이리스터 소자를 보호하기 위한 동작이 취해지기 때문에 사이리스터 변환기 동작에 가장 심각한 영향을 끼치는 사항으로 간주된다.

사이리스터를 이용하는 HVDC 전력변환기에 가장 치명적인 현상인 전류실패의 발생구조와 고장 발생시 시스템의 현상을 살펴보고 사이리스터의 보호동작을 살펴 보았다. 직류전류, 직류전압, 교류전압, 변압기 리액턴스에 의하여 영향을 받게 되는 정상 및 비정상적인 COMMUTATION 동작을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보고 제주-해남 직류송전설비의 COMMUTATION FAIL의 검출 및 보호 동작을 살펴 보았다.

(참 고 문 헌)

[1] EPRI, "High-Voltage Direct Current Handbook",

1st Edition", 1994 .

[2] J. Arrillaga et. al "High Voltage Current Transmission", IEE Power Engineering series 6, 1983

[3] Dennis A. Woodford "Basic Pricples of HVDC", <http://www.hvdc.ca/main/downloads/dcsun.pdf>, 1998

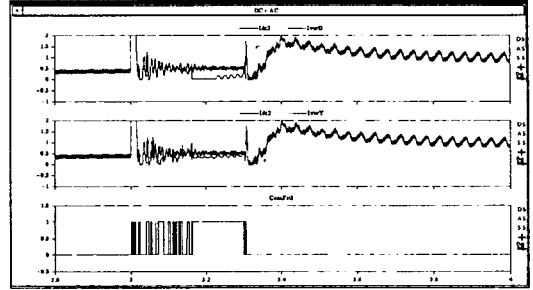


그림 9 Comm. Fail 시 DC 전류와 3상 AC 전류

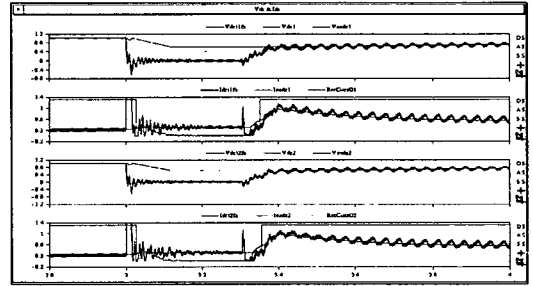


그림 10 Commutation Fail 발생시 Vd, Idc

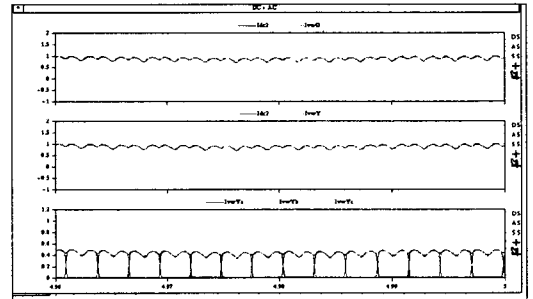


그림 11 Y-Y변압기 $|I_{Ya}| + |I_{Yb}| + |I_{Yc}|$ 전류
Y-Δ변압기 $|I_{Da}| + |I_{Db}| + |I_{Dc}|$ 전류
 I_a, I_b, I_c 3상 전류

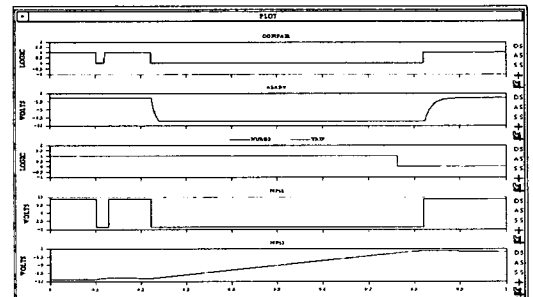


그림 12 ComFail 지속기간 20msec과 600msec의 동작비교