

제주계통에 적용 가능한 유형별 HVDC 시스템의 동적 안정도 연구

權寧勳*, 金容鶴[†], 金燦起^{**}, 崔泳道^{***}

A Study on Dynamic Stability of HVDC System Type which may be Applied the Jeju AC Network

Young-Hun Kwon, Yong-Hak Kim, Chan-Ki Kim and Young-Do Choy

요 약

Capacitor Commutated Converter HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템은 무효전력의 수급이 작기 때문에 점화각이 180도까지 증가시킬 수 있으므로 취약한 계통에 적용이 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 변압기와 밸브 사이에 직렬커패시터가 연결된 CCC 컨버터, CSCC 컨버터 및 전형적인 전류형 컨버터에 대해 분석하고, 계통의 안정도 측면에서 PSCAD/EMTDC로 CCC 컨버터의 HVDC를 모의함으로써 신뢰성이 높음을 제시하였다.

ABSTRACT

Capacitor Commutated Converter HVDC system is required the small reactive power. It has the advantage of an application to the weak grid because the firing angle α can be increased to a value well beyond 180°. In this paper, The three HVDC converter arrangements which are the CCC(Capacitor Commutated Converter) and the CSCC(Controlled Series Capacitor Converter) and Conventional Converter are compared the dynamic character. and it find that the CCC HVDC is operating with more reliability. The simulation was conducted to the PSCAD/EMTDC.

Key Words : HVDC, CCC(Capacitor Commutated Converter), CSCC(Controlled Series Capacitor Converter)

1. 서 론

직렬커패시터를 갖는 HVDC 시스템은 1950년대에 이미 연구 되었지만, CCC(Capacitor Commutated Converter) HVDC 시스템은 밸브와 변압기 사이에 직렬 커패시터가 위치하기 때문에, 밸브가 On/Off 하는

경우 밸브에 과전압이 인가되어 실용화가 어려웠다. 그러나 1980년대 ZnO 피뢰기 및 회생 스너버의 개발은 CCC HVDC 시스템의 실용화 가능성을 제시해 주었고, 1997년 아르헨티나와 브라질간 BTB(Back-to-Back) HVDC 시스템에서 처음으로 적용되면서 CCC HVDC 시스템은 본격적인 실용화가 시작되었다.^[1]

그외, CCC 컨버터 HVDC 시스템뿐만 아니라 변압기와 컨버터 사이에 커패시터를 설치한 CSCC(Controlled Series Capacitor Converter) 컨버터 HVDC 시스템도 실용화 되고 있는 추세이다. 이와 같은 HVDC 시스템의 개발은 전류형 HVDC 시스템이 유효 전력 약 60% 이상의 무효전력 수급이 필요하기 때문이다.

[†]교신저자 : 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원

E-mail : kimyh@kepri.re.kr

*정회원, 한전 전력연구원 일반연구원

**정회원, 한전 전력연구원 선임연구원

***정회원, 한전 전력연구원 일반연구원

접수일자 : 2007. 5. 14 1차 심사 : 2007. 6. 26

2차 심사 : 2007. 8. 27 3차 심사 : 2008. 3. 4

심사완료 : 2008. 4. 22

본 논문에서는 제주계통과 같이 무효전력 수급의 한계가 있는 계통의 경우, 별도의 무효전력원을 설치하는 것이 불가피하므로, 이를 효과적으로 제어할 수 있는 CCC 컨버터 HVDC 시스템과 CSCC 컨버터 HVDC 시스템을 기존의 전류형 HVDC 시스템과 PSCAD/EMTDC로 비교함으로써, CCC 컨버터 HVDC 시스템이 계통에 보다 안정적임을 제시하였다.

2. HVDC 시스템의 비교

2.1 전류형 HVDC 시스템

1960년대 초기 HVDC 시스템은 6펄스로 설계되었지만, 1970년 싸이리스터 밸브의 개발로 12펄스 컨버터가 실용화 되었으며, 최근 12펄스 컨버터에 커패시터를 결합한 컨버터가 실용화 되고 있다. 그림 1은 전류형 HVDC 시스템의 동작 특성을 나타낸 것이다.^[4]

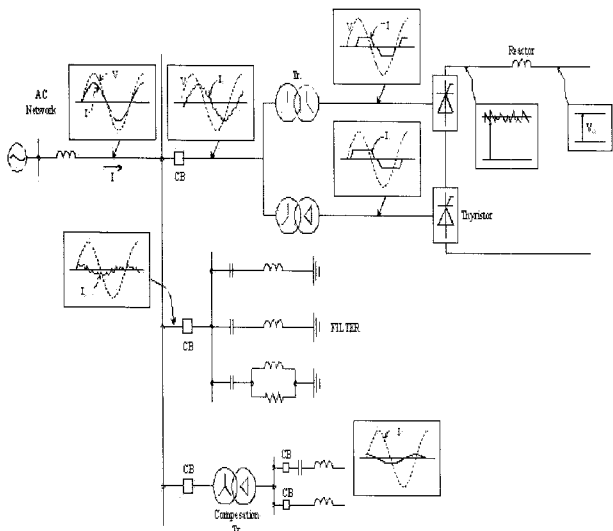


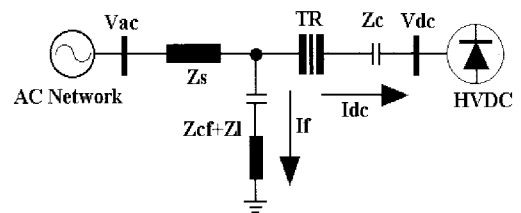
그림 1 전류형 HVDC 시스템 동작특성
Fig. 1 Dynamic characters of Conventional HVDC system

2.2 CCC HVDC 시스템

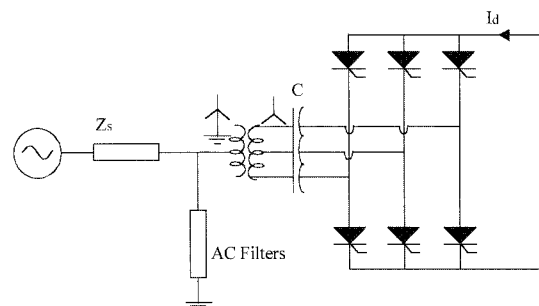
직렬커패시터를 갖는 HVDC 시스템은 1950년대에 연구되었으며, 그림 2와 같이 직렬커패시터가 밸브와 변압기 사이에 위치하고 있다. 이와 같은 CCC HVDC 시스템은 1997년에 BTB HVDC에 적용되면서 본격적인 실용화 연구가 진행되고 있으며, 전류형 HVDC 시스템에 비해 매우 낮은 무효전력을 필요로 하고, 또한 SCR(Short Circuit Ratio)이 낮은 계통에 적용이 가능하며, 기존의 전류형 HVDC 시스템에 비해 송전전력이 증가하는 장점을 갖고 있는 것으로 알려져 있다.

그림 2의 CCC HVDC 시스템에서 직류전류(I_d)는 직렬커패시터(Z_c)를 통해서 교류측에 인가되며, 즉 직렬커패시터는 변압기 2차측과 밸브 사이에 위치하여 충방전하면서 직류전류를 교류측에 인가한다. 따라서, CCC HVDC 시스템은 전류형 HVDC 시스템에 비해 컨버터측에 높은 전압이 인가되므로 스너버 회로 및 피뢰기 정격이 높게 설계되고 있으며, 아울러 밸브절연도 약 10% 높게 설계되고 있다.

또한, 직렬커패시터가 추가되기 때문에 정류전압의 증가로 인하여 정류기와 인버터측의 점호각이 증가하기 이 때문에 중복각이 감소하여 무효전력의 소모가 감소하게 된다.^[5]



(a) Equivalent circuit of CCC HVDC system



(b) 6-pulse CCC HVDC system

그림 2 CCC HVDC 시스템 구성
Fig. 2 CCC HVDC system configuration

그림 3에서 굵은 선은 밸브에 인가되는 전압을 나타내는 반면에 실선은 계통전압을 나타내고 있다. 즉, CCC HVDC 시스템에서는 상전압과 밸브전압간에 전압차가 발생하기 때문에 실질적으로 180°에서 소호가 가능하지만, 전류형 전류형 HVDC 시스템에서는 불가능하다. 물론, 이러한 특징은 전류형 HVDC 시스템에 비해 첨두전압이 증가하는 단점을 갖지만, HVDC 시스템에서 제어범위가 증가하므로 취약한 계통에서도 적용이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 또한, CCC HVDC 시스템은 직렬커패시터가 직류전류의 정류를 용이하게 하기 때문에 싸이리스터 소호각을 아주

작게 설정이 가능하고, 이론적으로 음(negative)의 값으로 설정이 가능하다. 특히, 소호각이 작다는 것은 HVDC 시스템의 역률이 높고, 무효전력의 소비가 작아진다는 것을 의미하므로 일반적인 HVDC 시스템과 비교해 HVDC 시스템의 효율과 안정도 높다는 장점을 갖고 있다.^[2]

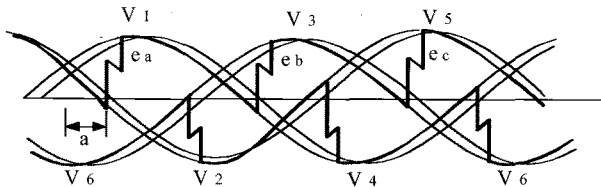


그림 3 CCC HVDC 시스템의 밸브전압과 상전압
Fig. 3 Valve voltage and phase voltage of CCC HVDC

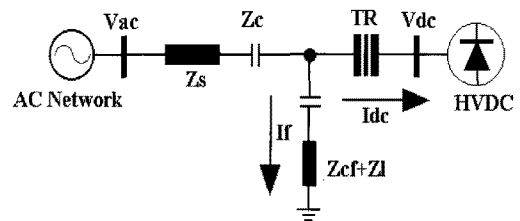
일반적인 HVDC 시스템은 교류계통에서 고장이 발생하면 인버터측의 직류전압은 감소하고 감소된 직류전압에 의한 돌입전류가 입력되어 정류실패를 유발함으로써 시스템이 차단될 수 있는 반면에, CCC HVDC 시스템의 직렬커패시터는 교류계통의 고장상태나 초기가압상태에서 직류전류가 증가함에 따라 직렬커패시터의 전압이 증가하여 소호각의 증가를 유발한다. 이러한 특징은 일반적인 HVDC 시스템에서 직류전류가 증가함에 따라 소호각이 감소하는 것과는 대조적이며, 이는 CCC HVDC 시스템이 갖는 장점 중에 하나로 정류실패를 유발하는 소호각 한계치가 작아도 된다는 것을 의미한다. 따라서, CCC HVDC 시스템은 정류기측보다는 인버터측에 보다 적합하고, 장거리 선로나 케이블과 같이 비제어성 전류가 많은 시스템 및 취약한 교류계통에 적합하다.

한편, CCC HVDC 시스템의 고장전류는 일반적인 HVDC 시스템과 비교하여 시스템 내에서 고장이 발생한 경우에 작아진다. 즉, 기존의 인덕턴스에 직렬커패시터를 추가하면 전체 임피던스가 감소하여 고장전류가 증가하는 것처럼 보이지만, 결과적으로 전류증가로 인한 커패시터의 충전전압(증가)을 고려하면 고장전류와 지속시간은 감소하게 된다.

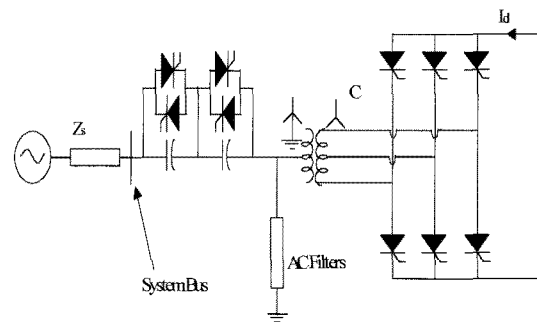
2.3 CSCC HVDC 시스템

CSCC HVDC 시스템은 기능 측면에서 CCC HVDC 시스템과 유사하지만, 그림 4에서 보여주는 바와 같이 시스템 구현 측면에서 서로 상이한 구성을 갖는다. 즉, CSCC HVDC 시스템은 직렬커패시터가 교류계통과 HVDC 변압기 사이에 위치한다. 특히, CSCC HVDC

시스템은 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)를 이용하여 철공진을 예방하고, 교류계통을 제어할 있다는 장점을 갖고 있다. 특히, CSCC HVDC 시스템은 TCSC 동작특성에 좌우되며, 이와 같은 TCSC는 양방향 싸이리스터와 커패시터를 하나의 쌍(pair)으로 스택을 10여개 직렬로 구성하여 바이패스 또는 순/역방향으로 도통하면서 계통과 HVDC에 따라 동작한다.^[5]



(a) Equivalent circuit of CSCC HVDC system



(b) 6-pulse CSCC HVDC system

그림 4 CSCC HVDC 시스템 구성
Fig. 4 CSCC HVDC system configuration

이와같은 CCC 및 CSCC HVDC 시스템은 모두 중복각이 감소하기 때문에 높은 고조파 전류가 발생되며, 교류계통에서 고장이 발생하거나 장거리 선로에서 급격한 직류전류 증가로 인한 정류실패(Commutation failure)가 발생할 수 있고, 특히 무효전력 제어 가능하므로 고조파 측면에서 교류필터가 요구된다.

3. PSCAD/EMTDC

제주계통에서 적용된 HVDC 시스템에 따라 동적안정도 분석을 위해 HVDC 시스템을 PSCAD/EMTDC 모델로 구성하고, 1Φ 및 3Φ 고장을 정류기측에 발생시

켜 모의하였다. 모의결과에 대한 판정기준은 다음 3.2항에서 제시된 바와 같다. 특히, 본 논문에서는 CCC 및 CSCC HVDC 시스템이 갖는 장점을 확인하고 모의함으로써 기존의 HVDC 시스템과 비교하였다.

3.1 PSCAD/EMTDC HVDC 모델링

그림 5는 HVDC로 연계된 제주계통을 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링을 수행한 결과를 보여주고 있다. 특히, 각각의 HVDC 시스템 제어기에 대한 모델링이 매우 중요하며, 전류형 HVDC 시스템을 기반으로 CCC 및 CSCC HVDC 시스템에 적용되는 커패시터 위치, 필터 등에 대해 특성을 적용하였다.

CCC HVDC 시스템의 소호각은 직렬커패시터에 의한 상변환을 고려하였으며, 점호각 한계값은 직렬커패시터에 따라 동작범위를 증가시켰으며, 직렬커패시터는 교류측 컨버터 변압기와 컨버터 사이에 설치하였다. CSCC HVDC 시스템의 소호각과 점호각은 CCC HVDC 시스템과 같이 직렬커패시터에 의한 상변환을

고려하였고, 직렬커패시터 제어기능이 추가되었다. 각각의 10개 직렬커패시터의 제어가 개별적으로 운용되고, 특히 고장이후에 복구시간 동안에 철공진 가능성을 최소화하기 위해 제어되었다.

제주계통은 PSS/E 프로그램을 사용하여 HVDC 시스템을 제외한 부분을 등가화하여 모의하였다.

3.2 모의결과 판정기준

HVDC 시스템 구성에 따른 모의결과 판정을 위하여 그림 6과 같이 시간에 따른 HVDC 과전압 곡선을 적용하여 판단한다.^[2]

- 인버터에서 검출된 고장이 해소될 때까지 200msec 이내에 90% 전력이 복구되어야 한다.
- 전압상승이나 과도현상이 최소로 발생되어야 한다.
- 그림 6와 같이 과전압이 제한되어야 한다.

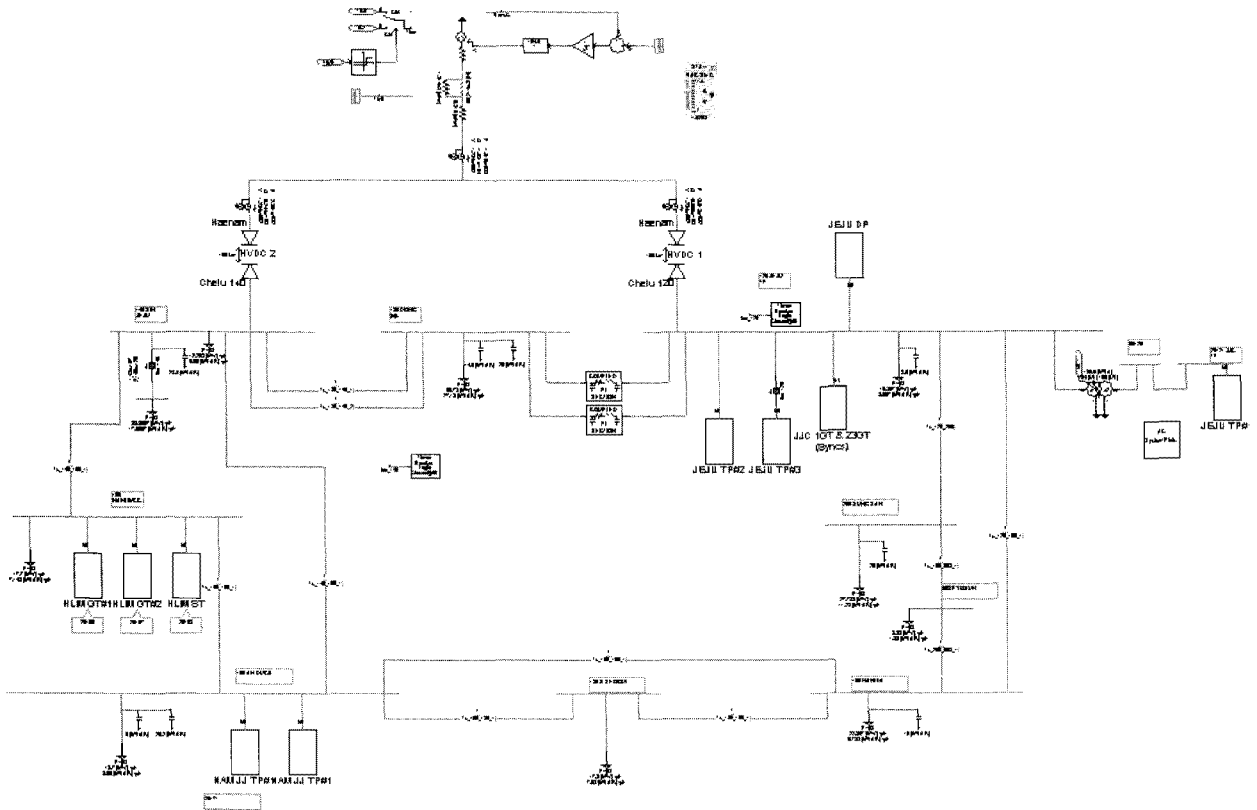


그림 5 제주계통 모델링(PSCAD/EMTDC)
Fig. 5 Jeju grid modeling(PSCAD/EMTDC)

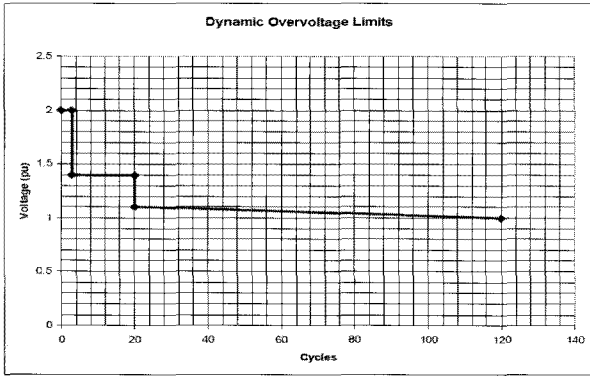
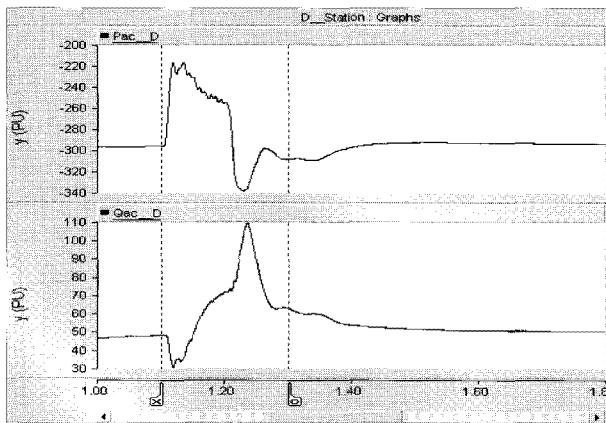


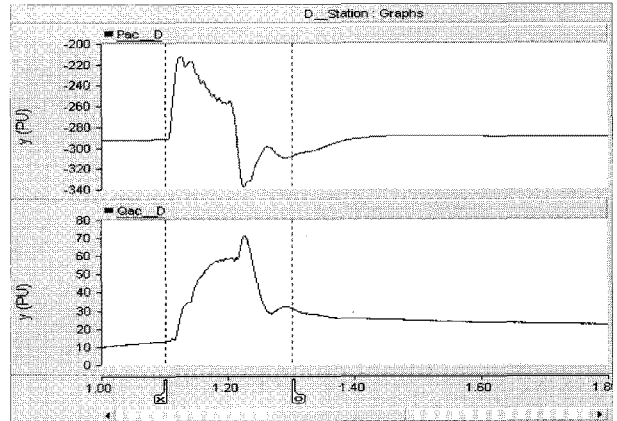
그림 6 HVDC 과전압 곡선
Fig. 6 Dynamic Overvoltage Limits

3.3 단상고장시 인버터측 유/무효전력

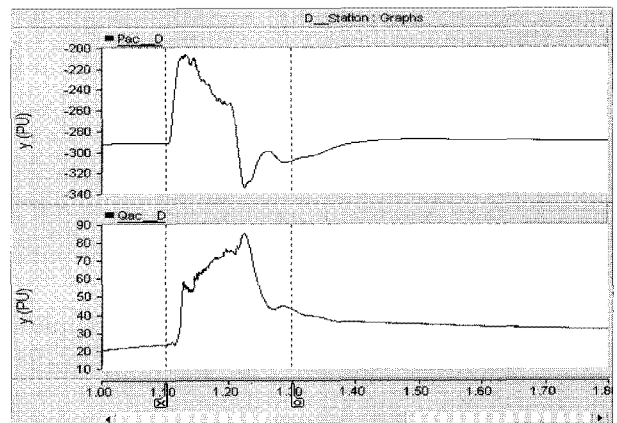
HVDC 시스템에서 계통모의는 1.1sec에서 고장을 발생시켜 100msec 지속시키고, 유/무효전력과 전압을 검토하였다. 그림 7에서는 교류측 단상고장시 인버터측 유효 및 무효전력을 보여주고 있다. CCC HVDC 시스템과 CSCC HVDC 시스템에서는 고장발생 이후에 무효전력 흡수가 전류형 HVDC 시스템에 비해 작고, 이러한 원인은 직렬커패시터가 설치되기 때문에 정류전압의 증가로 인하여 정류기와 인버터 점호각이 증가하게 된다. 따라서, 중복각이 감소하여 시스템의 무효전력 소모가 감소하게 된다. 즉, 전류형 HVDC 시스템(그림 7.(a))에서 가장 많은 무효전력 약 109.2MVar가 소모된 반면에, CCC HVDC 시스템(그림 7.(b))은 약 75.0MVar, CSCC HVDC 시스템(그림 7.(c))은 약 85.0MVar가 소모되었다. 결과적으로 CCC HVDC 시스템에서 무효전력이 가장 작게 요구되었다.



(a) Conventional HVDC system



(b) CCC HVDC system

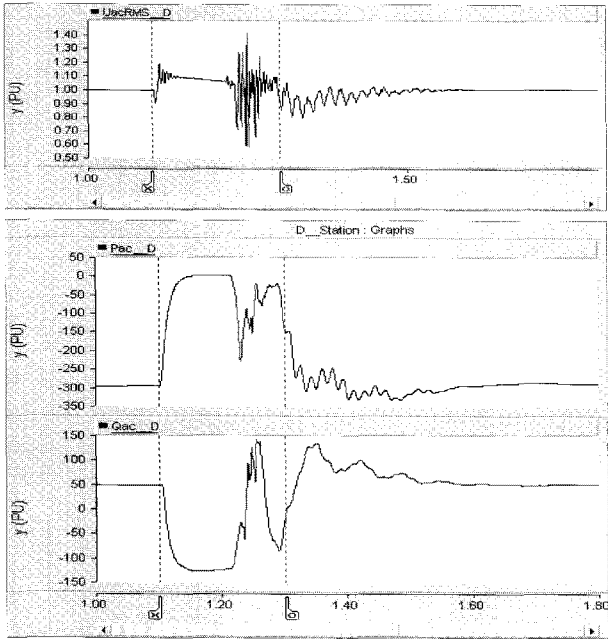


(c) CSCC HVDC system

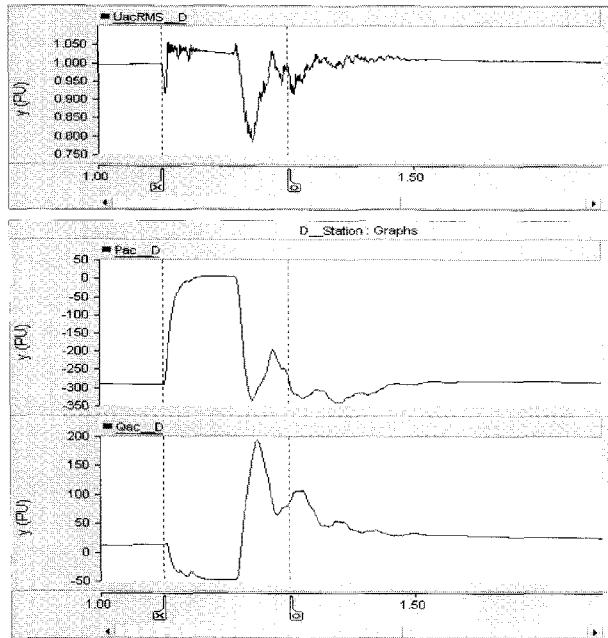
그림 7 단상고장시 인버터측 유/무효전력
Fig. 7 Power of Inverter side at AC 1Phase fault

3.4 삼상고장시 인버터측 유/무효전력

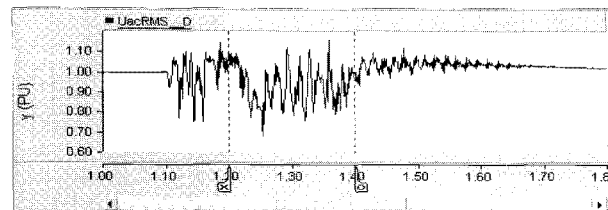
그림 8은 교류측 삼상고장시 전류형 HVDC 시스템, CCC HVDC 시스템 및 CSCC HVDC 시스템의 전압과 유/무효전력을 나타내고 있다. 그림 8(a)은 전류형 HVDC 시스템에서 고장발생을 모의한 것으로 고장발생 이후에 복구되는 동안에 전압변동이 약 0.6~1.4pu 까지 과도하게 발생하고, 또한 무효전력 변화량이 약 -120~150MVar 까지 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 전압변동이 발생하는 동안에 밸브의 점호각과 소호각 변화량을 검토하는 경우, 고장발생 후 점호각이 약 100° 까지 증가하고 있음을 그림 9(a)에서 보여주고 있다. 이러한 결과는 소호각 감소로 인한 정류실패를 유발할 수 있다.



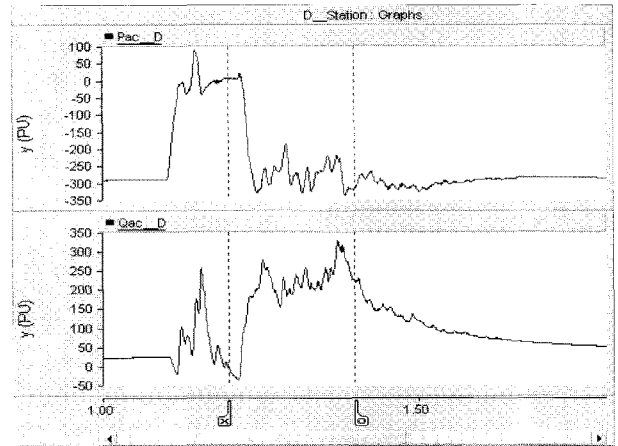
(a) Conventional HVDC system



(b) CCC HVDC system



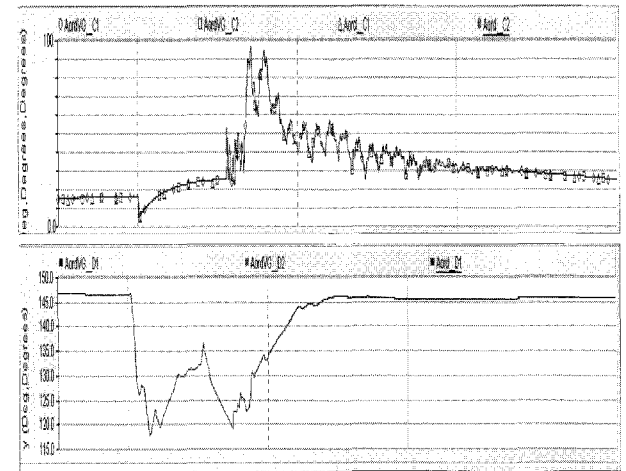
(a) Conventional HVDC system



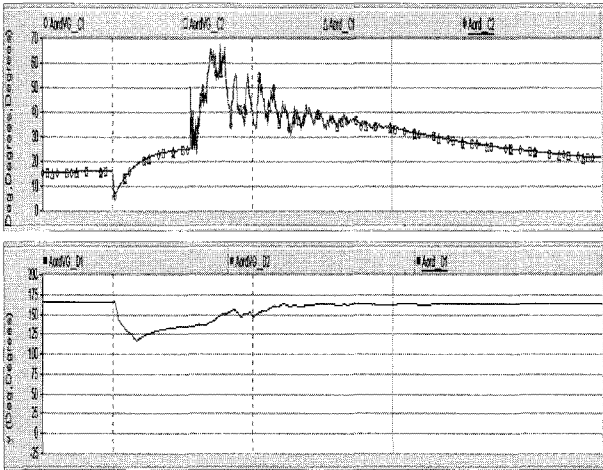
(c) CCC HVDC system

그림 8 삼상고장시 인버터측 전압 및 유/무효전력
Fig. 8 Voltage, P, Q of Inverter side at AC 3phase fault

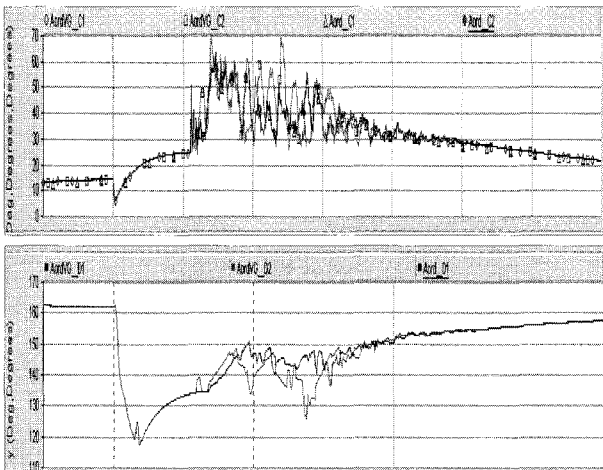
반면에 CCC HVDC 시스템에서는 그림 9(b)에서 보여주는 바와 같이, 고장발생후 점호각 변화가 약 $15^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 까지 발생하고 있으며, 이는 전류형 HVDC 시스템에 비해 변화량이 작다. 즉, 직렬커패시터로 인한 소호각 증가로 인해 점호각이 작게 변동함으로써 고장발생후 빠른 안정성을 보이고 있다. CSCC HVDC 시스템의 점호각과 소호각 변화량은 그림 9(c)에서 보여주며, 점호각 변화는 약 $15^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 까지 발생하고 있으며, 이는 CCC HVDC 시스템과 유사하지만, 각각의 극(pole)에 따라 점호각 및 소호각이 상이하며, 전압변동은 그림 8(c)과 같다.



(a) Conventional HVDC system



(b) CCC HVDC system



(c) CSCC HVDC system

그림 9 삼상고장시 인버터측 점화각 및 소호각
Fig. 9 Firing and extinction angle of Inverter side at AC 3Phase fault

4. 결 론

일반적으로 HVDC 시스템은 주파수 및 전압이 서로 다른 송/수전 계통에서 연계가 가능하고 각각의 계통에서 전기/기술적 제약 없이 독립적인 운전이 가능하며, 또한 컨버터 제어를 통해 신속한 전력제어가 가능하므로 파도안정도에 효과적인 것으로 알려져 있다. 이와 같은 장점으로 인하여 세계적으로 HVDC 시스템 운영이 관심에 대상으로 대두되고 있지만, 시스템 특성상 연계계통에 유효전력은 공급 가능하나, 무효전력은 공급이 불가능하므로 계통연계시 이러한 사항을 고

려할 필요가 있다.

본 논문에서는 기존에 운영하고 있는 전류형 HVDC 시스템에 대해 무효전력 수급, 정류실패 등을 보완하기 위하여 CCC HVDC 시스템, CSCC HVDC 시스템 등이 제안되고 있기 때문에, 이를 실계통에 적용하고 각각의 시스템 특성을 비교/검토하였다. 각각의 HVDC 시스템을 실계통에 적용한 결과는 다음과 같다.

취약한 계통에 CCC HVDC 시스템을 적용하는 경우, 정류기측 단상고장시 점화각이 약 15°~70° 까지 변화되었으나, 기존의 전류형 HVDC 시스템에 비해 변화량이 작았으며, 이는 직렬커패시터 영향으로 인해 무효전력의 작은 변동과 소호각 증가로 인해 HVDC 시스템의 제어가능 범위가 증가하고 있음을 보였다. 반면에, CSCC HVDC 시스템은 철공진을 방지하기 위한 직렬커패시터에 대해 독립적인 제어시스템을 구성하였지만, 교류측 3상 고장시 철공진 현상이 발생하여 계통에서 진동이 발생하였다.

결론적으로 CCC HVDC 시스템이 기존의 전류형 HVDC 시스템에 비해 작은 무효전력을 필요로 하고, 취약한 계통에 적용이 가능하며, 전류형 HVDC 시스템에 비해 송전전력이 증가하는 등 계통연계시 보다 효과적으로 것으로 검토되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김찬기, 장길수, 임성주, 추진부, "HVDC와 전력전자", 생능출판사, pp. 384-387, 2007. 2.
- [2] "제주 HVDC #2 타당성 연구", 전력연구원, '06전력연-단192, pp. 18, 2006.
- [3] A.M. Gole and R.W. Menzies, "Analysis of Certain Aspects of Forced Commutated HVDC Inverter", *IEEE Trans. PAS*, Vol. PAS-100, No 5, pp. 2258-2262, 1981.
- [4] H.M. Turanli and R.W. Menzies, "Feasibility of DC Transmission with Forced Commutation to Remote Loads", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 103, No. 5, pp. 1256-1262, 1984.
- [5] T. Johnson and P. Bjorklund, "Capacitor Commutated Converters for HVDC", *Stockholm Power Tech*, pp. 44-51, 1995.
- [6] D.A. Woodford, "Solving the Ferroresonance Problem when Compensation a DC Converter Station with a Series Capacitor", *IEEE Trans. Power System*, Vol. 11, No. 3, pp. 1325-1331, 1996.

부 록

전류형 HVDC 시스템

DC전압 : 180 kV
 DC전류 : 0.833kA
 DC전력 : 2×150MW
 Smoothing Reactor : 2×200mH
 Transformer Impedance : 0.12pu
 AC필터 : 11차, 13차 고조파 제거용 2×27.5MVA,
 High Pass 필터 2×27.5MVA

CCC HVDC 시스템

DC전압 : 180 kV
 DC전류 : 0.833kA
 DC전력 : 2×150MW
 Smoothing Reactor : 2×200mH
 Transformer Impedance : 0.12pu
 AC필터 : 11차, 13차 고조파 제거용 2×13.75MVA,
 High Pass 필터 2×13.75MVA

CSCC HVDC 시스템

DC전압 : 180 kV
 DC전류 : 0.833kA
 DC전력 : 2×150MW
 Smoothing Reactor : 2×200mH
 Transformer Impedance : 0.12pu
 AC필터 : 11차, 13차 고조파 제거용 1×13.75MVA,
 High Pass 필터 1×13.75MVA



김찬기(金燦起)

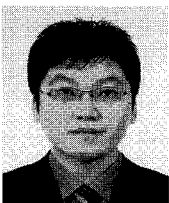
1968년 12월 17일생. 1991년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 당 학회 학술위원.



최영도(崔泳道)

1973년 11월 2일생. 2000년 명지대 전기전자공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 일반연구원.

저 자 소 개



권영훈(權寧勳)

1975년 4월 24일생. 1999년 홍익대 전기공학과 졸업. 2008년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 전력계통해석그룹 연구원.



김용학(金容鶴)

1968년 8월 13일생. 1994년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 전력연구원 선임연구원.