

AC/HVDC 시스템의 조류계산 및 EMTP 시뮬레이션

김진하*, 정교범*, 오성철**

*홍익대학교 전기공학과, **한국기술교육대학교 전기공학과

Load Flow Calculation and EMTP Simulation of AC/HVDC System

Jin-Ha Kim*, Gyo-Bum Chung*, Sung-Chul Oh**

*Dept. of Electrical Eng. Hongik Univ., **Dept. of Electrical Eng. Korea Univ. of Technology and Education

Abstract - In order to find the steady-state operating condition of HVDC system interacting with AC power system, the load flow calculation of AC/HVDC system is performed. For the calculation, each generating unit is modeled by an equivalent voltage source and coupled impedance. The rectifier station is modeled by a controlled DC voltage source. EMTP simulation of the AC/HVDC system is also performed to verify the result of the load flow calculation.

스터 보호를 위한 스너버, Y-Y 결선 변압기 및 Y-Δ 결선 변압기, 고조파 제거를 위한 필터, 무효전력 보상을 위한 캐패시터 뱅크 및 DC 전력제어를 위한 제어기 등으로 구성되어 있다. 제어기는 사이리스터 스위칭 신호를 만들고, HVDC 시스템의 DC 전압 V_{dc} 를 조절하여 전력을 제어한다. 발전기단은 등가 전압원 및 등가 임피던스로 모델링되었고, 저항과 인덕턴스를 이용하여 송전선 및 부하를 모델링 하였다.

1. 서론

AC/HVDC 시스템은 자연전류방식의 컨버터를 사용하기 때문에, 전력계통에 연계된 HVDC 시스템의 상대적 크기인 Short Circuit Ratio (SCR)이 작을수록 사이리스터의 전류 실패 확률이 높으므로, 캐패시터 뱅크 및 고조파 제거를 위해서 설치된 필터를 이용하여 무효전력을 보상하여 SCR 문제를 해결한다[1],[2].

HVDC 시스템의 사이리스터 점화각 α 는 AC/HVDC 시스템의 정수 및 운전조건에 의해서 결정되며, 전력계통 내의 조류흐름을 제어한다. 시스템 정수는 고조파 필터, 캐패시터 뱅크, 변압기, 송전선, 부하 및 발전기에 의해 결정된다[3].

따라서 본 논문은 전력계통에 연계된 AC/HVDC 시스템의 운전상태를 파악하기 위해서, 각종 구성요소를 고려한 조류계산을 수행하여 사이리스터 점화각 α , 전압, 전류, 유효전력 및 무효전력을 구하고, EMTP 시뮬레이션을 통해서 결과를 검증하였다.

2. 본론

2.1 AC/HVDC 시스템 모델

그림 1은 전력계통에 설치된 HVDC 시스템의 모델을 보인다. HVDC 시스템은 12-스텝 사이리스터 인버터, 사이리

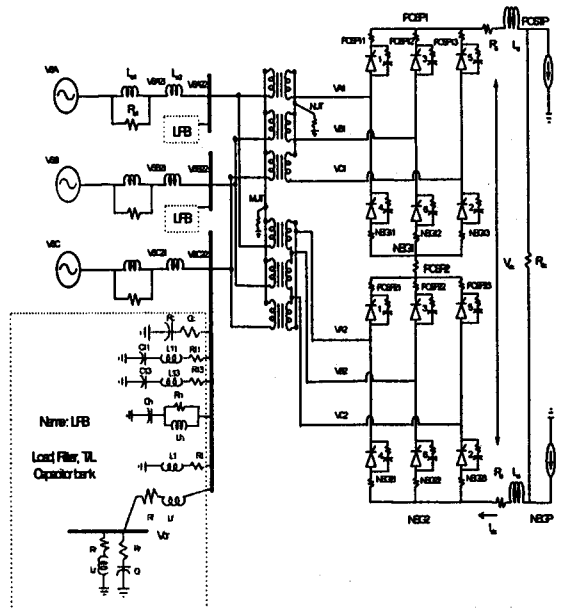


그림 1. 전력계통에 설치된 HVDC 시스템의 인버터단

2.2 AC/HVDC 시스템의 조류 계산

HVDC 시스템은 발전기, 송전선, 부하 등으로 조합된 전력계통에 연계되어 있다. 사이리스터 점화각 α 는 직류송전 전력량을 조절하며, 전력계통에 새로운 운전점을 형성한다.

따라서 AC/HVDC 시스템의 조류 계산을 수행하여 시스템의 전력, 전압, 전류분포를 해석할 필요가 있다. 그림 2는 조류계산을 위해 등가 처리된 AC/HVDC 시스템 회로도를 보인다. Z_s 는 인버터 단에서 전력계통을 등가 처리한 무한 모선과의 임피던스이다. Z_i 는 인버터 단에 연결된 각종 부하 및 고조파 필터, 캐패시터 뱅크를 등가 처리한 임피던스이고, Z_x 는 인버터 단에 연결된 Y-Y 결선 변압기와 Y-Δ 결선 변압기를 등가 처리한 임피던스이다.

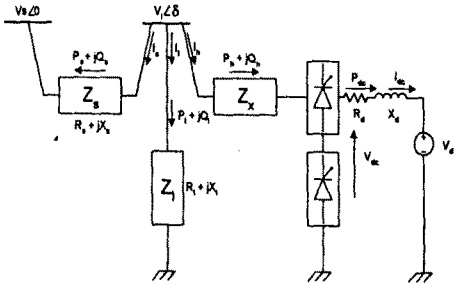


그림 2. AC/HVDC 시스템의 조류계산 모델

무한 모선 전압 V_s 의 위상각을 0° 로 가정하였고 식 (1)과 같다.

$$V_s = |V_s| \angle 0 \quad (1)$$

HVDC 시스템의 인버터 단의 교류 전압 V_i 은 식 (2)와 같다.

$$V_i = |V_i| \angle \delta \quad (2)$$

따라서 모선 V_i 에서 무한모선 V_s 로 흐르는 전력조류와 모선 V_i 에서 부하 Z_l 로 흐르는 전력조류는 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$P_s + jQ_s = 3 \cdot V_i \cdot I_i^* = 3 \cdot V_i \cdot \left(\frac{V_i - V_s}{Z_s} \right)^* \quad (3)$$

$$P_l + jQ_l = 3 \cdot V_i \cdot I_l^* = \frac{3|V_i|^2}{Z_l} \quad (4)$$

모선 V_i 에서 HVDC 인버터로 흐르는 교류전류 I_h 는 식 (5)와 같다.

$$I_h = |I_h| \angle \phi \quad (5)$$

따라서 인버터로 흐르는 전력조류는 식(6)과 같다.

$$P_h + jQ_h = 3 V_i \cdot I_h^* = 3 V_i \angle \delta \cdot |I_h| \angle -\phi \quad (6)$$

그림 2에서 V_d 는 HVDC 시스템의 정류기단에서 제어되는 직류 전압이다. 본 연구에서는 직류 전압원으로 등가 처리하였고, V_{dc} 는 12-스텝 싸이리스터 인버터의 출력전압이며, V_d 와의 관계는 식(7)과 같다.

$$V_{dc} = I_{dc} \cdot R_d + V_d \quad (7)$$

싸이리스터 점화각 α 와 V_{dc} 와의 관계는 식(8)과 같다.

$$V_{dc} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot |V_i| \cdot \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_c \cdot I_{dc} \quad (8)$$

직류전류 I_{dc} 와 교류전류의 실효치 I_h 는 근사적으로 식 (9)를 만족한다.

$$|I_h| = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} \quad (9)$$

Y-Y 결선 변압기와 Y-Δ 결선 변압기의 손실을 무시하면, 전력 조류 P_h 와 P_{dc} 의 관계는 식 (10)과 같다.

$$P_h = P_{dc} = 3 |V_i| I_h \cos(\delta - \phi) = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (10)$$

따라서 인버터 단의 모선 V_i 에서 전력 방정식은 식 (11), (12) 및 (13)과 같다.

$$P_s + P_l + P_h = f_1(|V_i|, \delta, \phi) = 0 \quad (11)$$

$$Q_s + Q_l + Q_h = f_2(|V_i|, \delta, \phi) = 0 \quad (12)$$

$$P_{dc} = f_3(|V_i|, \delta, \phi) = P_{sch} \quad (13)$$

식(11), (12), (13)을 만족하는 $|V_i|$, δ , ϕ 를 구하기 위해서 Newton-Raphson 수치해석법을 사용한다[4]. 그림 3은 조류계산을 위한 Flow Chart이고 표 1은 AC/HVDC 시스템 정수이고, 표 2는 조류계산의 결과이다.

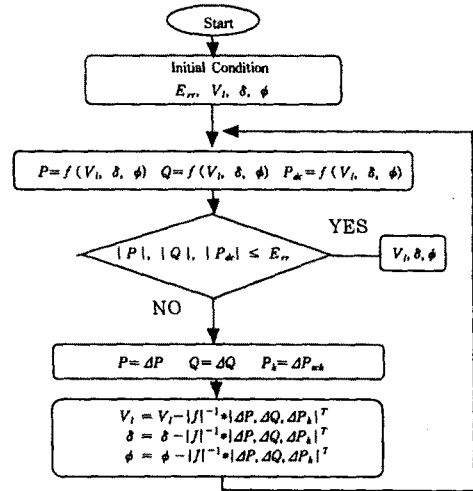


그림 3. AC/HVDC 조류계산 흐름도

R_s	15 Ω	R_l	100 Ω	L_{13}	54 mH
L_{a1}	27 mH	L_1	88 mH	R_h	166 Ω
L_{a2}	54 mH	R_{11}	1 Ω	L_h	9 mH
R_f	12 Ω	L_{11}	50 mH	C_h	1.5 μF
L_f	200 mH	R_{13}	1 Ω	C_c	17.6 μF
R_r	300 Ω	L_r	284 mH	C_r	4 μF
R_d	12 Ω	L_d	100 mH	L_{TR}	37 mH
V_s	141 KV	V_{dc}	-300 KV	P_{dc}	300 MW

표 1. 조류 계산 및 EMTF 시뮬레이션을 위한 시스템 정수

V_i	116.7 KV	δ	-4.2°	V_{dc}	-287.5 KV
I_h	1043 A	ϕ	125.9°	I_{dc}	1032 A
P_h	-300 MW	P_s	-183 MW	P_l	483 MW
Q_h	484 Mvar	Q_s	-282 Mvar	Q_l	-202 Mvar

표 2. 조류 계산 결과

2.3 EMTP 시뮬레이션

HVDC 시스템의 정상상태 및 과도상태를 해석하기 위해 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)를 이용한 시뮬레이션 연구를 수행하였다[5]. HVDC 시스템은 300MW를 전력계통에 투입하고 있으며, 정류기단의 직류전압 V_{dc} 는 300KV로 설정하였다. 또한 교류 시스템의 무한모선 전압의 실효값을 141KV라고 가정하고 조류계산을 수행하면 사이리스터 점화각 117.5° 가 구해진다. 이 값을 이용하여 EMTP 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 4는 인버터 단의 모선 전압 V_1 과 사이리스터 점호를 위한 EMTP TACS 신호를 보여준다. 점화각 α 가 117.5° 임을 알 수 있다.

그림 5는 인버터 출력 선전류 I_h 와 출력단 모선 전압 V_1 및 무한 모선 전압 V_s 의 EMTP 시뮬레이션 파형을 보인다. 선전류 I_h 는 12 펄스 인버터의 Y-Y 변압기와 Y- Δ 변압기의 선전류를 합성한 파형이며, 기본파의 크기는 2300A이고, 무한 모선 전압 V_s 의 위상각을 기준하여, 인버터 전류 I_h 는 125.9° 의 위상 지연을 보인다. 모선 V_1 은 $\sqrt{2} \cdot 116.7KV$ 의 최대값을 갖는다.

그림 6은 DC전력 P_{dc} 및 AC전력 P_s 의 파형을 보인다. EMTP 시뮬레이션은 HVDC 시스템의 전력조류가 표 2의 조류계산 결과와 일치함을 보인다.

그림 7은 -287KV 직류 전압 및 1043A 직류 전류를 보인다. 직류전압은 720Hz의 고조파 성분을 가지나, 100mH DC 리액터에 의해서 직류전류의 고조파 성분은 충분히 감소되어 보이지 않는다.

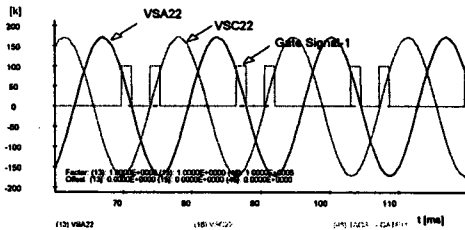


그림 4. 사이리스터 점호 신호와 인버터 터미널의 상전압 V_1

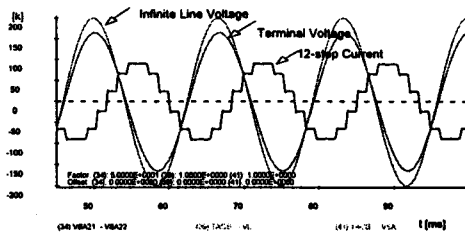


그림 5. 출력단 선전류 I_h , 출력단 부스 전압 V_1 및 무한 모선 전압 V_s 의 파형

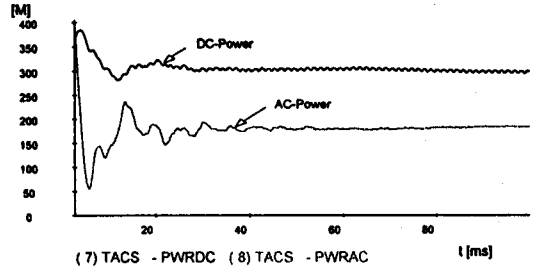


그림 6. 직류 전력 P_{dc} 및 교류 전력 P_s 의 파형

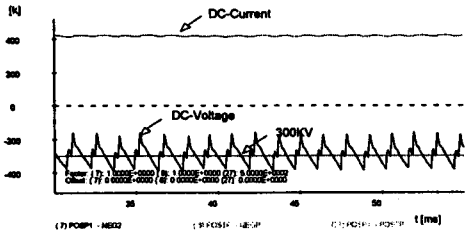


그림 7. 인버터의 출력 직류전압 V_{dc} 및 직류전류

3. 결론

본 연구는 전력계통에 연계된 HVDC 시스템의 정확한 전력제어를 위해서 AC/HVDC 시스템의 상호작용을 고려한 조류계산을 수행하여 사이리스터 점화각 α 를 구하였다. 또한, HVDC 시스템의 EMTP 시뮬레이션을 수행하여 조류계산 결과와 비교·검증하였다. 향후 HVDC 시스템의 인버터 단과 정류기단을 고려한 상세한 연구가 계속해서 수행되어져야겠다.

본 연구는 한국 전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음 (과제관리번호 96-055)

4. 참고 문헌

- [1] Xiao Jiang, "An Energy Recovery For HVDC System," IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 9, No. 1, Jan. 1994.
- [2] E. W. Kimbark, "Direct Current Transmission," John Wiley & Sons, Inc., pp. 343-384, 1972.
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, Inc., pp. 463-580, 1994.
- [4] Stagg and El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill, pp. 249-250, 1968
- [5] John Reeve, "Versatile Interactive Digital Simulator Simulator Based on EMTP For AC/DC Power System Transient Studies," Vol. PAS-103, NO. 12, Dec.1984.