

초고압 직류 송전 시스템에 대한 최적 변조 제어기의 적용 및 제어 특성에 관한 연구

이종민*, 허동렬*, 정동일*, 정형환*
* 동아대학교 전기공학과

A Study on Control Characteristic and Application of Optimal Modulation Controller for HVDC Transmission System

J. M. Lee*, D. R. Hur*, D. I. Chung*, H. H. Chung*
* Dept. of Electrical Engineering at DongA Univ.

Abstract - Recently, according to the growth of national economy and the improvement of lining conditions, electric power demand is increasing gradually. So it is being examined to construct large thermal power plants or nuclear plants. For the effective use of lands and for the economy of generations sites, the distance between generation and demand locations becomes farther and farther. At the same time, people desire higher quality or electric power.

So in this paper, the optimal modulation controller for HVDC transmission system are designed by a recursive algorithm that determines the state weighting matrix Q of a linear quadratic performance. It means that the application of optimal modulation controller in HVDC transmission system can contribute the propriety to the improvement of the stability in HVDC transmission system.

1. 서 론

초고압 직류송전은 전력 전송을 능동적으로 지속하게 제어할 수 있고, 교류선로의 단락용량 증대를 억제할 수 있어 교류송전의 한 대안으로 대두되고 있다. 이러한 특성 때문에 우리 나라에서는 제주와 해남을 연결하는 초고압 직류송전 선로가 건설되어 운전 중에 있다. 또한 통일된 후 남·북한간의 전력연계가 실현될 경우, 북한의 전력제통이 취약하여 안정도 문제가 야기될 수 있으므로, 초고압 직류송전은 남·북한간의 전력제통 연계에 가장 적절한 수단이 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 초고압 직류송전의 안정도를 향상시키기 위하여 최적변조제어기를 이용하여 연구하였다. 최적 변조 제어기는 최적 제어이론을 기초로 하여 상태가중치를 체계적으로 선정하고, 복잡한 수식을 간소화 할 뿐만 아니라 계산과정에 있어 반복 횟수를 최소화시키는 순환 알고리즘을 이용하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 다양한 직류제통에 적용하여 직류 시스템의 기본적인 제어 및 최적제어와 비교·분석하였다. 그리고 부하 외란은 초기 전력이 증가되었을 때, 교류 시스템의 회전자각의 각속도 및 직류 시스템의 직류전류의 동특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 이러한 과정을 통하여 초고압 직류송전 시스템의 안정도를 향상시키기 위하여 최적 변조 제어기 적용이 타당함을 입증하였다.

2. 계통 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 대표적인 초고압 직류송전 시스템 모델은 그림 1과 같으며 이는 직류 시스템의 제어기 성능평가에 널리 사용되는 시스템이다. 또한 교류 시스템의 여자기 및 조속기는 IEEE Type을 사용하

였고, 직류 시스템은 전력을 양방향으로 전송할 수 있는 초고압 직류 시스템을 사용하였다.

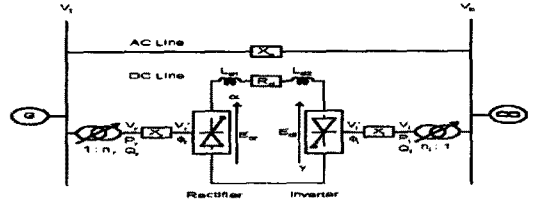


Fig. 1 HVDC transmission model for analysis system

2.1 교류 시스템

그림 1에서 발전기 회전자 운동 방정식은 식(1), (2)와 같다.

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \tag{1}$$

$$\frac{d \Delta \delta}{dt} = \Delta \omega \tag{2}$$

2.2 직류 시스템

변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시하고, 그림 2를 기초로 한 변환기의 교류전류 I와 직류전류 I_d는 식(3), (4)와 같이 된다.

$$I \cong \sqrt{6} I_d / \pi \tag{3}$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}(V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma)}{\pi R_d + 3(X_r - X_i)} \tag{4}$$

여기서 X_r, X_i는 전류리액턴스(commutation reactance), R_d는 직류선로 저항, γ는 여유각, V_r, V_i는 변환기의 교류측 전압이다.

○ 순변환기측(Rectifier Side)

순변환기측의 제어각이 접호각 α인 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(5)~(19)과 같다.

$$E_{dr} = (3\sqrt{2}/\pi) V_r \cos \alpha - (3/\pi) X_r I_d \tag{5}$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d X_r}{V_r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r} \right)^2 + 2 \left\{ 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d X_r}{V_r} \sin \phi_r \right\}}} \tag{6}$$

$$\tan \phi_r = \sqrt{\left(\frac{\pi E_{dr} + 3 I_d X_r}{\pi E_{dr} \cos \alpha} \right)^2 - 1} - \frac{18 I_d X_r}{\pi^2 E_{dr}} \tag{7}$$

$$P_r = \sqrt{3} V_r' I \cos \phi_r \tag{8}$$

$$Q_r = \sqrt{3} V_r' I \sin \phi_r + (18/\pi^2) I_d^2 X_r \tag{9}$$

○ 역변환기측(Inverter Side)

역변환기에서도 유사한 형태로 구성되는데 소호각 β 로 제어하는 경우, 시스템 방정식을 요약하면 식(10)~(14)와 같다.

$$E_{di} = (3\sqrt{2}/\pi) V_i \cos \beta + (3/\pi) X_i I_d \quad (10)$$

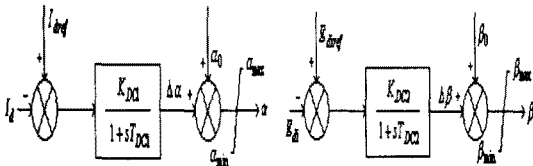
$$\cos \beta = \cos \gamma_{\min} - \sqrt{2} X_i / V_i \quad (11)$$

$$\tan \phi_i = \sqrt{\left\{ \frac{\pi E_{di} + 3 I_d X_i}{\pi E_{di} \cos \alpha} \right\}^2 - 1} - \frac{18 I_d X_i}{\pi^2 E_{di}} \quad (12)$$

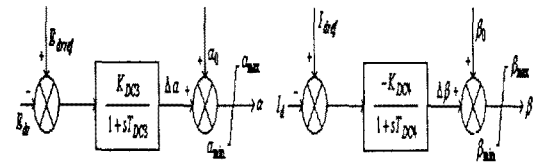
$$P_i = \sqrt{3} V_i I \cos \phi_i \quad (13)$$

$$Q_i = \sqrt{3} V_i I \sin \phi_i + (18/\pi^2) I_d^2 X_i \quad (14)$$

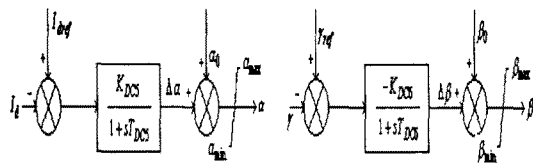
본 연구에서는 순·역변환기의 운전 제어방식을 정전류-정전압제어(Case 1), 정전압-정전류제어(Case 2), 정전류-정여유각제어(Case 3), 정전력-정여유각제어(Case 4)로 구성하여 순변환기측은 점호각 α 를 제어하고, 역변환기는 소호각 β 를 제어하도록 하여 특성을 고찰하였다. 그림 2-5는 각 경우의 직류 제어시스템 블록선도이다.



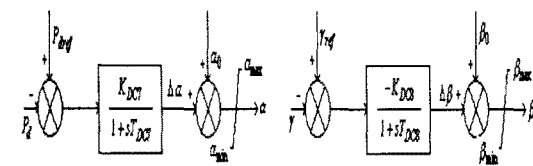
(a) ACR in rectifier (b) AVR in inverter
Fig. 2 Block diagram of Case 1



(a) AVR in rectifier (b) ACR in inverter
Fig. 3 Block diagram of Case 2



(a) ACR in rectifier (b) AVR in inverter
Fig. 4 Block diagram of Case 3



(a) APR in rectifier (b) AVR in inverter
Fig. 5 Block diagram of Case 4

3. 최적 변조 제어기 설계

3.1 순환 알고리즘

시스템의 상태방정식은 식(15)와 같이 쓸 수 있다.
 $\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (15)$
 먼저 식(15)로부터 2차 형식의 평가함수를 식(16)으로 정의한다.

$$J = 1/2 \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (17)$$

식(17)를 최소화 하는 최적 제어입력은 식(18)과 같이 얻어지며 이는 선형 상태공간에서만 취급한다.

$$u = -R^{-1} B^T K x \quad (18)$$

시스템이 시불변이라고 가정하면 식(19)와 같이 대수 Riccati 방정식이 구해진다.

$$KA + A^T K - KBR^{-1} B^T K + Q = 0 \quad (19)$$

$K = [\text{constant matrix}]$

상태 가중치 Q 를 결정하는 순환 알고리즘은 최적 제어이론을 바탕으로 하고 있다. 우선, 상태 행렬의 초기값과 상태 가중치 행렬의 초기값은 식(20)과 같이 선택한다.

$$A_0 = A, \quad Q_0 = Q \quad (20)$$

순환 알고리즘을 적용하기 위하여 Hamilton 행렬 형태로 표현하면 식(21)와 같다.

$$[M_{i-1}] = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -Q_{i-1} & -A^T \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서, M_{i-1} 은 n 차 시스템의 $2n \times 2n$ 행렬이고, 복소평면 위에 이 행렬의 고유치는 대칭적이어서 실수축과 허수축으로 나눌 수 있다.

M_{i-1} 의 고유벡터 방정식은 식(22)와 같이 쓸 수 있다.

$$[M_{i-1}] [X] = [X] [A] \quad (22)$$

여기서 $[A]$ 는 $2n$ 요소를 갖는 대각 고유치 행렬, $[X]$ 는 $2n \times 2n$ 요소를 갖는 고유 벡터 행렬이다.

M_{i-1} 에 해당하는 $2n$ 개 고유치들을 대각 행렬로 쓰면 식(23)과 같고, 고유벡터 행렬을 $n \times n$ 행렬로 분할하면 식(24)와 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_- & 0 \\ 0 & A_+ \end{bmatrix}, \quad [A_-] = -[A_+] \quad (23)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} X_I & X_{III} \\ X_{II} & X_{IV} \end{bmatrix} \quad (24)$$

식(24)로부터 식(19)의 Riccati 행렬 K 의 해는 식(25)와 같다.

$$K = X_{II} X_I^{-1} \quad (25)$$

본 논문에서는 상태 가중치를 결정하기 위하여 복잡한 수식을 간소화 할 수 있고, 계산시간을 단축할 수 있도록 안정화 계수 p_s 를 도입하면 식(26)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_i = Q_{i-1} - 2p_s K \quad (26)$$

여기서, $0 < p_s < 1$ 이다.

결정된 상태 가중치 Q_i 를 이용하여 식(27)의 대수 Riccati 방정식의 안정화 해 K_S 를 결정하고, 식(28)의 최적 제어 시스템 방정식을 계산한다.

$$AK_S + K_S A^T - K_S B R^{-1} B^T K_S + Q_i = 0 \quad (27)$$

$$A_F = A - B R^{-1} B^T K_S \quad (28)$$

최적 변조 제어기 입력신호를 선택하기 전에 식(28)의 고유치를 구하여, 고유치가 개선되었는지 확인하여 그렇지 않을 경우에는 식(21)에서부터 다시 반복 수행한다.

3.2 최적 변조제어

최적 변조제어기는 최적 제어이론을 바탕으로 하였으며, 상태가중치를 선정함에 있어서는 복잡한 수식을 간소화 할 수 있고, 반복횟수를 최소화 할 수 있는 순환 알고

리즘을 이용하여 상태가증치를 체계적으로 선정하였다. 따라서 최적 변조제어 입력 신호는 다음 식(29)~(32)와 같다.

$$U_e = K_\omega \Delta\omega \quad (29)$$

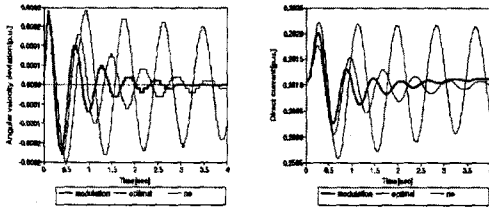
$$U_g = K_\omega \Delta\omega + K_{P_m} \Delta P_m \quad (30)$$

$$U_{dcr} = K_\omega \Delta\omega \quad (31)$$

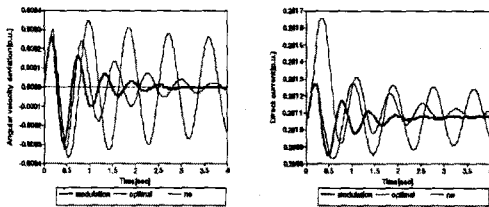
$$U_{dci} = K_\omega \Delta\omega \quad (32)$$

4. 시뮬레이션 및 결과

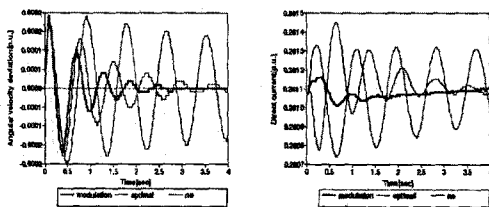
부하가 0.1[sec] 사이에 정적출력이 3[%] 증가한 경우에 대해서 각 직류제어 방식에 적용하여 각속도 편차 특성과 직류전류를 고찰하였다.



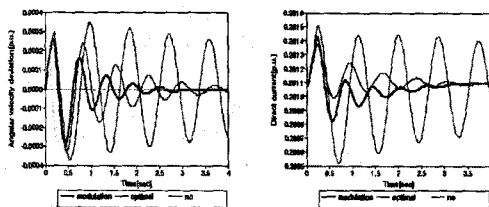
(a) Angular velocity $\Delta\omega$ (b) Direct current I_d
Fig. 6 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms] (Case 1)



(a) Angular velocity $\Delta\omega$ (b) Direct current I_d
Fig. 7 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms] (Case 2)



(a) Angular velocity $\Delta\omega$ (b) Direct current I_d
Fig. 8 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms] (Case 3)



(a) Angular velocity $\Delta\omega$ (b) Direct current I_d
Fig. 9 Dynamic response to increasing power 3[%], disturbance duration 100[ms] (Case 4)

다음 표 1은 각 경우에 대하여 오버슈트와 언더슈트를 비교하였다. 표 1에서 나타나듯이 초고압 직류송전 시스템에 최적 변조 제어를 이용한 방법이 다른 제어 방법보다 우수한 특성을 보이고 있다.

Table 1 Simulation results for Each case

Control method		Modulation	Optimal	No	SPR
Cases		$\Delta\omega$ [p.u.]	$\Delta\omega$ [p.u.]	$\Delta\omega$ [p.u.]	[%]
Case 1	1st O.S	0.00019	0.00019	0.00019	0.00
	2nd O.S	0.00010	0.00013	0.00019	47.37
	1st U.S	-0.00017	-0.00018	-0.00020	15.00
Case 2	1st O.S	0.00025	0.00026	0.00030	16.67
	2nd O.S	0.00016	0.00024	0.00035	54.28
	1st U.S	-0.00029	-0.00033	-0.00037	21.62
Case 3	1st O.S	0.00019	0.00019	0.00019	0.00
	2nd O.S	0.00010	0.00013	0.00019	47.37
	1st U.S	-0.00017	-0.00018	-0.00020	15.00
Case 4	1st O.S	0.00025	0.00026	0.00030	16.67
	2nd O.S	0.00016	0.00024	0.00035	54.28
	1st U.S	-0.00029	-0.00033	-0.00037	21.62

5. 결론

본 논문에서는 초고압 직류송전 시스템에 최적 변조 제어를 적용하여 다양한 직류제어 시스템의 제어특성과 부하 외란에 대한 안정도를 고찰하였다. 직류제어계통의 순변환기-역변환기 운전제어방식을 정전류-정전압 제어, 정전압-정전류제어, 정전류-정역유각제어, 정전력-정역유각제어로 구성하였다.

본 논문에서 제안한 순환 알고리즘은 상태가증치를 체계적으로 선정할 뿐만 아니라 복잡한 수식을 간소화 할 수 있었고, 계산과정에 있어 반복횟수를 최소화 할 수 있었다. 또한 초고압 직류송전 시스템에 대한 최적 변조 제어기의 동특성이 우수한 속응성을 나타낼 뿐만 아니라 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있었다. 따라서 초고압 직류송전 시스템에서 다양한 직류제어 방식에 최적 변조 제어기의 적용이 타당함을 입증할 수 있었다.

장차 대기 계통의 초고압 직류송전 시스템에 대한 연구가 계속하여 이루어져야 할 것으로 사료된다.

(참고 문헌)

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] R. L. Cresap, W. A. Mittelstadt, "Small signal Modulation of the Pacific HVDC Intertie", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 95, No. 2, pp. 536-541, 1978.
- [3] N. A. Vovos, G. D. Galanos, "Damping of Power Swings in AC Tie Lines Using a Parallel DC Link Operating at Constant Reactive Power Control", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No. 2, 1979.
- [4] F. Nozari, C. E. Grund, and R. L. Hauth, "Current Order Coordination in Multiterminal DC Systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, 1981.
- [5] P. K. Dash, A. C. Liew, A. Routray, "High-performance Controllers for HVDC Transmission Links", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 5, September 1994.
- [6] H. H. Chong, Y. P. Wang, D. R. Hur and Y. H. Moon, "A Design of Optimal PID Controller in HVDC Transmission System Using Modified Genetic Algorithm", KIEE Transaction, Vol. 48, No. 3, pp. 247-256, 1999