

DC 링크를 포함한 전력계통의 최적조류계산

*안병철, 왕용필, 허동렬, 정형환, 주수원
 동아대학교 전기공학과

A Study on Optimal Power Flow Method for Intergrated AC/DC Systems

*B. C. An, Y. P. Wang, D. Y. Hur, H. H. Chong, S. W. Joo
 Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

Abstract - This study established AC-DC system model including DC Link, and then DC Link equation was derived from the model. The equation was included into the calculational algorithm of AC system and solved using fast decoupled method. To minimize the line loss of AC-DC system, optimum theory was applied to the equations.

1. 서 론

저손실의 경제적 송전과 안정도 향상의 측면에서 직류송전의 우수성이 인정되고 있는 가운데 실계통 확립과 이에 대한 연구가 세계적으로 활성화되고 있으며, 또한 국내에서도 최초의 HVDC 계통인 제주도와 해남간의 송전선로가 현재 건설 중이며, 조만간 운전 개시할 예정이다. 이에 따라 본 논문은 DC링크를 포함하는 AC-DC 시스템 모델을 구성하고, 구성되어진 모델에서 DC링크 방정식을 유도한 후 고속분할법을 사용하여 AC 전력 조류계산 반복과정 속에 포함시키켜 연산하는 방법을 제안하였다. 또한 AC-DC 전력계통의 선로손실을 최소화하기 위하여, 최적화기법을 적용하여 조류계산을 실행하는 방법에 대하여 제안코자 한다.

2. DC 링크를 포함한 전력계통의 조류계산

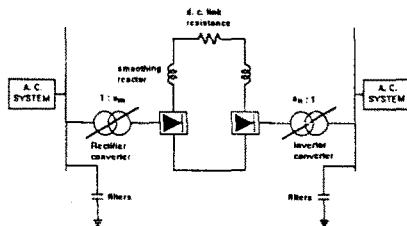


Fig. 1 Basic model of an DC interconnection which includes two winding converter transformers and filters at terminal busbar

DC링크의 기본 모델은 그림 1과 같이 표시할 수 있다. 이 DC링크 기본모델의 등가회로는 그림 2와 같다.

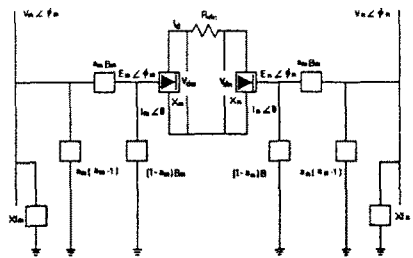


Fig. 2 Equivalent circuit of the basic model of an DC interconnection

그림 2에서 컨버터터의 AC와 DC측에 대한 전압은 식(1)과 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{dm} = K_1 E_m \cos \phi_m \quad (1)$$

$$V_{dn} = K_1 E_n \cos \phi_n \quad (2)$$

변압기 저항을 무시하면, 정류기 끝(m)에서 유효, 무효분에 대해 위상을 고려한 전류방정식은 식(3)으로 쓸 수 있다.

$$-K_1 I_d = B_m E_m \sin \phi_m - B_m a_m V_m \sin \psi_m \quad (3)$$

또, DC전압 항도 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$0 = V_{dm} - K_1 a_m V_m \cos \psi_m \quad (4)$$

유사한 방정식이 인버터터 끝(n)에서도 적용될 수 있다.

$$-K_1 I_d = B_n E_n \sin \phi_n - B_n V_n a_n \sin \psi_n \quad (5)$$

$$0 = V_{dn} - K_1 a_n V_n \cos \psi_n \quad (6)$$

따라서 DC전압과 전류와의 관계도 식(7)~식(9)로 표현할 수 있다.

$$V_{dm} = K_1 E_m \cos \alpha_m - K_2 X_m I_d \quad (7)$$

$$V_{dn} = K_1 E_n \cos \alpha_n - K_2 X_n I_d \quad (8)$$

$$V_{dm} - V_{dn} = R_{dc} I_d \quad (9)$$

여기서 α_m, α_n 은 각 컨버터터의 제어각이다.

식(2-1)~식(2-9)까지는 13개의 변수(V_{dm} , V_{dn} , E_m , E_n , ϕ_m , ϕ_n , a_m , a_n , ψ_m , ψ_n , I_d , a_m , a_n)가 존재한다. 13개의 변수를 풀기 위해서는 식(1)~(9)의 9개의 링크 방정식 이외에 4개의 제어방정식과 제어장치 지정이 요구된다. DC변수 중 컨버터터 점호각, 고정된 변압기 탭을 지정할 수 있고, 이외에도 컨버터터 역률, 단자 유효전력 혹은 직류전류 등이 지정될 수 있다.

오차방정식의 형태는 식(10)과 같이 둔다.
 $X_{di}^{sp} - X_{di} = 0$ (10)

일반적인 AC-DC연계시스템의 결합된 자코비 행렬은 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & D \\ J & L & E \\ B & C & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \\ \Delta X_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 H, N, J와 L은 DC링크가 연결된 모선의 대각선 부분을 제외하고는 AC시스템에서와 같은 구조의 값을 가지며, 따라서 N과 J는 무시되어진다. 그리고 AC시스템과 DC링크의 기준위상이 다른 이유로 $\partial R/\partial \theta = 0$ 이므로 B의 요소는 모두 0이며, DC변수의 변화에 대한 유효전력의 변화는 매우 적으므로 D는 무시할 수 있다. 또한, C와 E는 정류기와 인버터가 연결된 AC모선에 관련된 몇 개의 요소를 제외하고는 0 요소로 구성된다.

이상의 고찰로부터 식(12)과 (13)의 분할된 2개의 자코비 행렬방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k/V_k \\ \Delta P_m/V_m \\ \Delta P_n/V_n \end{bmatrix} = B' \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_k/V_k \\ \Delta Q_m/V_m \\ \Delta Q_n/V_n \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'' & & \\ & B_{mm}'' & AA'' \\ & B_{nn}'' & '' \\ BB'' & & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta V_m \\ \Delta V_n \\ \Delta X_d \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 B'와 B''는 단순한 AC시스템 요소이다.

B_{mm}'' 는 식(14)과 같다.

$$B_{mm}'' = B_{mm}''(ac) + \frac{\partial Q_m(dc)/V_m}{\partial V_m} \quad (14)$$

여기서 $Q_m(dc) = V_m K_i a_m I_d \sin \psi_m$ 이고, B_{nn}'' 에 대해서도 마찬가지로이다.

$$\text{행렬 } A, AA'' \text{는 } \frac{\partial R}{\partial X_d}, \frac{1}{V_i} \left[\frac{\partial Q_i(dc)}{\partial X_d} \right] (i=m,n)$$

으로써 비대칭이며 그리고 반복때마다 값이 변한다.

BB'' 도 $\frac{\partial R}{\partial V_i}$ ($i = m, n$)이며, 또한 매우 스파스하다.

3. AC-DC 전력계통의 최적조류계산

$[x]$ 를 미지의 변수벡터, $[y]$ 를 지정된 변수벡터라 두고, 지정된 변수 $[y]$ 에서 어떤 독립변수가 최적화를 위하여 조정 가능하다고 할 경우, 이 조정 변수를 제어 파라미터라고 부른다.

벡터 $[y]$ 는 식(15)과 같이 제어 파라미터 $[u]$ 와 고정 파라미터 $[p]$ 벡터로 나눌 수 있다.

$$[y] = \begin{bmatrix} [u] \\ [p] \end{bmatrix} \quad (15)$$

제어 파라미터는 P, V 노드에서 전압크기, 변압기 탭 비율 그리고 경제적 처리에 유용한 유효전력 P_G 로 할 수 있다.

라그랑주 승수(Lagrangian multipliers)의 고전적 최적화법을 사용하여서, 조류계산의 전력방정식을 조건으로 하는 독립변수 $[u]$ 를 갖는 함수 f 의 최소화는 식(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\min f(x, u) \quad (16)$$

$[u]$

식(16)의 최소화는 보조변수 λ 를 삼입함으로 구한다. 최소화를 위한 라그랑주함수는 식(17)과 같다.

$$\mathcal{L}(x, u, p) = f(x, u) + [\lambda]^T \cdot [g(x, u, p)] \quad (17)$$

$[\lambda]$ 속의 λ 를 라그랑주 승수라 부른다.

식(4-26)으로부터 최소화를 위한 조건식은 다음과 같다.

$$\left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} \right] = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^T \cdot [\lambda] = 0 \quad (18)$$

$$\left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u} \right] = \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u} \right]^T \cdot [\lambda] = 0 \quad (19)$$

$$\left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} \right] = [g(x, u, p)] = 0 \quad (20)$$

전력조류 해석의 전력조건인 식(20)은 만족되어지고, $[\lambda]$ 를 식(18)을 만족하도록 구한다.

그러면 오직 $[\partial \mathcal{L} / \partial u] \neq 0$ 이며, 이 벡터는 중요한 의미를 가지고 있다. 이것은 목적함수의 일정한 등고선에 직교하는 구배(gradient) 벡터 $[\nabla f]$ 이다.

구배법의 기본개념은 목적함수를 향하여 매우 작은 값을 가지고 마이너스 구배방향으로 새로운 유연한 해석점으로 움직이는 것이다.

구배법의 해석 순서는 아래와 같다.

- ① 제어파라미터의 세트 $[u]$ 를 가정한다.
- ② 뉴턴-라프슨법에 의한 유연한 전력조류 해석을 구한다.
- ③ 식(18)에서 $[\lambda]$ 에 대한 식(21)를 구한다.

$$[\lambda] = - \left(\left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^T \right)^{-1} \cdot \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] \quad (21)$$

- ④ 식(19)속에 식(21)를 대입하여 구배를 계산하면 식(22)가 된다.

$$[\nabla f] = \left[-\frac{\partial f}{\partial u} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u} \right]^T \cdot [\lambda] \quad (22)$$

구배 $[\nabla f]$ 는 $[u]$ 의 변화에 관련된 목적함수의 감도이다.

- ⑤ 만약, $[\nabla f]$ 가 충분히 적다면, 최소치에 도달하는 것이다.

- ⑥ 식(23)을 형태로 부터 새로운 제어 파라미터 셋트를 발견한다.

$$[u^{new}] = [u^{old}] + [\Delta u] \quad (23)$$

여기서, $[\Delta u] = -C \cdot [\nabla f]$ 이다.

- ⑦ 그리고 ②로 돌아간다.

구배법 해석 이론에서 중요한 부분은 ⑥ 단계이다. 식(23)은 조정식이며, C의 값에 의존되게 된다. 매우 적은 C는 수렴은 보증하지만 반복횟수가 매우 많아지고, 매우 큰 C는 진동하게 된다.

4. 모델 계통의 적용 및 결과

지금까지 설명한 이론에 따라 DC링크를 포함하는 전력계통의 조류계산을 하기 위하여 그림 3과 같은 모델을 적용하였다.

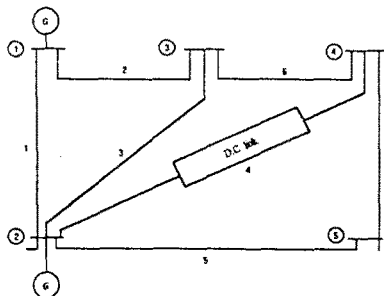


Fig. 3 Model system

적용 모델 계통은 5모선 시스템으로서 선로정수는 표 1과 같으며 DC링크의 데이터는 표 2와 같다. 또한 시스템의 각 모선에 주어진 운전조건은 표 3과 같다.

Table 1. Line data for model system (100 MVA base[p.u])

선로 번호	모선간 접 속	임피던스	선로충전용량
1	1-2	0.02000+j0.06000	0.00000+j0.03000
2	1-3	0.08000+j0.24000	0.00000+j0.02500
3	2-3	0.06000+j0.18000	0.00000+j0.02000
4	2-4	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000
5	2-5	0.04000+j0.12000	0.00000+j0.01500
6	3-4	0.01000+j0.03000	0.00000+j0.01000
7	4-5	0.08000+j0.24000	0.00000+j0.02500

Table 2. DC Link data

X_m	X_n	R_{dc}	a_m	a_n	ϕ_m	ϕ_n
0.060	0.250	0.060	1.000	1.10	7.0	7.5

Table 3. Bus data for model system(100MVA base[p.u])

모선	전 압 초기값	Generation		Load	
		P_G	Q_G	P_L	Q_L
1	1.06	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	1.00	0.40000	0.30000	0.20000	0.10000
3	1.00	0.00000	0.00000	0.45000	0.15000
4	1.00	0.00000	0.00000	0.40000	0.05000
5	1.00	0.00000	0.00000	0.60000	0.10000

4.1 AC-DC 조류계산의 결과

그림 3의 모델계통에서 연산한 조류계산 결과는 표 4~표 6과 같다.

Table 4. Computed power flows

선로 번호	모선간 접 속	P[MW]		모선간 접 속	P[MW]	
		Q[MVAR]	Q[MVAR]		Q[MVAR]	Q[MVAR]
1	1 - 2	70.7	3.4	2 - 1	-69.8	-7.4
2	1 - 3	63.0	16.2	3 - 1	-59.9	-12.1
3	2 - 3	60.5	18.2	3 - 2	-58.3	-15.5
4	2 - 4	-48.4	-8.7	4 - 2	47.68	15.60
5	2 - 5	78.0	18.1	5 - 2	-75.6	-14.0
6	3 - 4	73.2	12.6	4 - 3	-72.6	-12.8
7	4 - 5	-15.5	-8.1	5 - 4	15.7	4.0

Table 5. Voltage and power for each bus (100MVA base[p.u.])

모 선	전압값	발전 단		부 하 값	
		P	Q	P	Q
1	1.0600	1.337	0.196	0.000	0.000
2	1.0435	0.400	0.030	0.200	0.100
3	0.9780	0.000	0.000	0.450	0.150
4	0.9666	0.000	0.000	0.400	0.050
5	0.9944	0.000	0.000	0.600	0.100

Table 6. Output of DC Link

E_m	E_n	ϕ_m	ϕ_n	ψ_m	ψ_n	V_{dm}	V_{dn}	I_d
1.037	1.038	0.20	0.27	0.182	0.325	1.371	1.350	0.350

4. 2 AC-DC 최적조류계산 결과

Table 7. Voltage and power for each bus (100MVA base, [p.u.])

모 선	전 압 값	발 전 단		부 하 단	
		P_G	Q_G	P_L	Q_L
1	1.2691	1.293	0.022	0.000	0.000
2	1.2602	0.400	0.300	0.200	0.100
3	1.2103	0.000	0.000	0.450	0.150
4	1.2013	0.000	0.000	0.400	0.050
5	1.2234	0.000	0.000	0.600	0.100

Table 8. Computed optimal power flows

선로 번호	모선간 접 속	P[MW]		모선간 접 속	P[MW]	
		Q[MVAR]	Q[MVAR]		Q[MVAR]	Q[MVAR]
1	1-2	71.4	-8.5	2-1	-70.5	1.6
2	1-3	57.9	10.7	3-1	-55.7	-11.8
3	2-3	60.4	13.5	3-2	-58.9	-15.0
4	2-4	-45.55	-7.8	4-2	45.86	17.86
5	2-5	77.3	12.6	5-2	-75.7	-12.4
6	3-4	69.7	11.8	4-3	-69.3	-13.7
7	4-5	-15.7	-9.3	5-4	15.8	2.4

Table 9. Output of DC Link

	E_m	E_n	ϕ_m	ϕ_n	ψ_m	ψ_n	V_{dm}	V_{dn}	I_d
구속이 없는 경우	1.26	1.29	0.18	0.30	0.16	0.37	1.67	1.66	0.27

표 7에서 표 9는 최적 조류계산한 결과 모선전압과 전력 그리고 선로의 조류결과이며 전력손실은 7.03[MW]이었다. 2장의 결과와 비교해 보면, 전력손실은 0.55[MW] 감소하였다.

4. 결 론

DC 링크 방정식을 명확히 규명하여 조류계산 알고리즘을 보다 간단히 수식화시킴으로써 연산기의 기억용량을 감소시킬 수 있는 DC링크를 포함하는 AC-DC 연계계통에서의 조류계산에 관하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고속분할 알고리즘에 의하여 얻어질 수 있는 신뢰성, 계산속도 및 기억용량에 관한 이점은 AC/DC 조류계산에서도 마찬가지로 유지되었다.

2) 13개의 비선형방정식으로 이루어진 최종 DC 모델은 필터, 컨버터, 변압기 및 직류선로 등을 포함해서 나타낼 수 있었다.

3) DC 링크의 변수를 13개의 변수에서 9개의 변수로 감소시킴으로써 기억용량은 많이 감소되었고 반복횟수는 다소 증가하였다.

4) 전체계통의 손실과 전력조류는 두 경우가 거의 동일한 결과값을 나타내었다.

5) DC변수의 계산결과값도 큰 차이가 없었다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Aoki and M. Kanazashi, "A Modified Newton Method for Optimal Power Flow Using Quadratic Approximated Power Flow", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-104, pp.2119-2125, (1985)
- [2] M. El-Marsafawy, "Inclusion of DC Networks in a Power Flow Solution of AC System using Decoupled Power Flow Method in Rectangular Form", Modelling Simulation & Control A(France), AMSF Press, Vol. 10, No. 2, pp. 1-7, (1987)
- [3] 고희석, 이준탁, 김해재, 정형환, "교류-직류 병렬 송전계통의 동태 안정도에 관한 연구", 전기학회논문지, Vol.40, No.9, pp.851-858, (1991)
- [4] 정형환, 김해재, 정동일, 고희석, "고속분할법을 이용하여서 D.C.링크를 포함한 전력계통의 조류계산", 전기학회 논문집, Vol. 42, No. 5, pp. 52-59, (1993)
- [5] 정형환, 왕용필, 김해재, 이태기, 고희석, "교류-직류 계통에 있어서 발전기에 대한 최적 PID 제어기의 적용과 제어 특성", 전기학회논문지, Vol. 44, No. 6, pp. 717-725, (1995)