

현존하는 D.C.링크를 포함한 전력계통의 조류계산

정 형환*, 이 광우*, 안 병철*, °주 석민*, 고 회석**

* 동아대학교 ** 경남대학교

Load Flow Calculations for Power Systems with Existing D.C. Links

H.H. Chong*, K.W. Lee*, B.C. An*, °S.M. Joo*, H.S. Koh**

* Dong-A Univ. ** Kyung-Nam Univ.

Abstracts - In this paper a comprehensive d.c. link model is developed with generality to represent all the plant components and operating conditions. The voltage ambiguity which is shown in other papers is removed.

The New Zealand a.c.-d.c. scheme is used as a test system, and the results show that a fast-decoupled load-flow solution of a.c. systems interconnected by d.c. link converges for all practical operating conditions.

1. 서 론

D.C.링크는 빠뜨릴수 없는 a.c. 조류계산 과정속에 포함시켜 설명하고 있다. 이를 모델은 d.c.링크 표현의 간소화와 조류계산의 어려운 형태에 대한 융통성에 대해서 역설하였다. 이를 모두는 13개의 변수로서 모델을 간단히 하였다.

그렇지만, 현존하는 실제 링크에 있어서는 구성이 매우 복잡하고 그 이상의 변수와 방정식을 요구한다.

여기서는 현존하는 New Zealand 기구를 관찰하여 적당한 모델을 만든다. 이것을 a.c.시스템에 포함시켜서 고속분활법을 사용하여 조류계산을 하였다.

2. 현존하는 시스템

현존하는 d.c. 링크 시스템은 New Zealand의 Benmore와 Haywards 지방사이에 연결된 직류송전 100MVA 계통을 대표적으로 들 수 있다.

조류계산 해석에 적합한 등가회로는 그림 1에서 나타내고 있다.

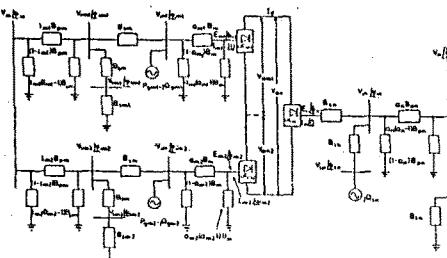


그림 1. 조류계산 해석에 적합한 링크의 수학적 등가회로

그림 1은 왼쪽 a.c.시스템 쪽으로 너무 많이 불 필요한 것을 확장시키고, 그리고 컨버터터 변압기 네어 설비들은 a.c. 시스템 내부로 쉽게 포함시킬 수 있는 인상을 주고 있다.

그래서 연결 변압기(interconnecting transformer) 텁이 d.c.링크 전력 전달의 함수가 되고, 그림 2에서 표현되는 여

러 노드(node)들은 표준 a.c.조류 계산속에 적당한 방법으로 지정할 수 없다.

아래사항이 고려중인 d.c.링크의 작용특성을 설명하는데 도움이 될 것이다.

(a) 왼쪽 Haywards에서 a.c.단자전압은 컨버터터 변압기의 3권선에서 동기조상기에 의해 항상 일정하며, 컨버터터 변압기 텁은 양쪽 끝에서 일정하다.

(b) 컨버터터 양쪽에서 일정한 제어각을 주기위해 오른쪽 Benmore에서 발전기 모션전압은 조정되고, 링크의 각 극을 통하는 전력은 일정하다. 그리고 연결 변압기는 텁 변환을 용이하게 해 두었다.

(c) 중부하 하에서 왼쪽 Benmore 모션은 유효·무효 발전기를 가지고, 경부하에서는 이 발전기가 동기 조상기로서 작용한다.

3. D.C.시스템 방정식

그림 1에서 컨버터터 a.c.와 d.c. 전압 사이에 식(1)~(3)과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$V_{dm1} = k_1 a_{m1} V_{m1} \cos \phi_{m1} \quad (1)$$

$$V_{dm2} = k_1 a_{m2} V_{m2} \cos (\phi_{m2} - \omega_m) \quad (2)$$

$$V_{dn} = k_1 a_n V_n \cos \phi_n \quad (3)$$

전류에 대해서도 유사하다.

$$I_{m1} = k_1 I_d$$

$$I_{m2} = k_1 I_d$$

$$I_n = k_1 I_d$$

컨버터터 a.c.전류는 d.c. 모델 변수에 대해서 위상부호를 갖는데, 왼쪽 한 극(pole) 만이 불균형 작용으로 ω_m 을 사용하였다.

직류전압과 전류가 관계되는 식(4)~(7)의 4개의 방정식이 있다.

$$V_{dm1} = k_1 a_{m1} V_{m1} \cos \alpha_{m1} - k_2 X_{m1} I_d \quad (4)$$

$$V_{dm2} = k_1 a_{m2} V_{m2} \cos \alpha_{m2} - k_2 X_{m2} I_d \quad (5)$$

$$V_{dn} = k_1 a_n V_n \cos \alpha_n - k_2 X_n I_d \quad (6)$$

$$R_{dc} I_d = V_{dm1} + V_{dm2} - V_{dn} \quad (7)$$

3권선 변압기 조정 노드에서 유효·무효 전력 편차 등으로부터 유도할 수 있는 방정식들은 여기서 생략한다.

아래에 설명하고 있지만, d.c.링크의 작용·성질에 의하고 또는 3권선 변압기의 제 3에 연결된 등가회로에 의한 일정한 제어 방정식이 남아있다.

3-1. 제어 특성 설명

7개의 제어 방정식은 d.c.링크에 변수에 해당되는 15개가 요구되는데, 전체 시스템 설명에서 모두 줄 수 있다.

2 절에서 서술한 것 같이, 뉴질랜드 링크 작용양식에 관하여 아래와 같은 방정식을 모든 경우에 쓸 수 있다.

a) 제어각이 일정

$$\cos \alpha_{m1}^{sp} - \cos \alpha_{m1} = 0 \quad (8)$$

$$\cos \alpha_{m2}^{sp} - \cos \alpha_{m2} = 0 \quad (9)$$

$$\cos \alpha_n^{sp} - \cos \alpha_n = 0 \quad (10)$$

b) 컨버터 변압기 템을 고정

$$a_{m1}^{sp} - a_{m1} = 0 \quad (11)$$

$$a_{m2}^{sp} - a_{m2} = 0 \quad (12)$$

$$a_n^{sp} - a_n = 0 \quad (13)$$

c) 3개의 방정식이 3권선 변압기의 3번째에 시스템 요소와 관련되고 있다. 왼쪽에서 오직 필터만이 연결되어 있어서 무효전력 편차는 이용할 수 있고, 오른쪽에서는 동기 조상기가 단자전압에 있다.

$$\Delta Q_{tm1}/V_{tm1} = 0 \quad (14)$$

$$\Delta Q_{tm2}/V_{tm2} = 0 \quad (15)$$

$$V_n^{sp} - V_n = 0 \quad (16)$$

d) d.c.링크의 각 극을 통한 전력전달이 일정

$$P_{dm1} = V_{dm1} I_d \quad (17)$$

$$P_{dm2} = V_{dm2} I_d \quad (18)$$

e) 나머지 두 방정식은 경부하 혹은 경부하 동작조건에 따른 왼쪽 발전기에 의한다.

i) 발전기인 경우

만약 V_m 이 일정하면 다음과 같다.

$$t_{m1} - t_{m2} = 0 \quad (19a)$$

$$V_m^{sp} - V_m = 0 \quad (20a)$$

만약 V_m 이 일정치 못하면 다음과 같게 된다.

$$t_{m1}^{sp} - t_{m1} = 0 \quad (19b)$$

$$t_{m2}^{sp} - t_{m2} = 0 \quad (20b)$$

ii) 동기 조상기인 경우

$$\Delta Q_{m2}/V_{m2} = 0 \quad (19c)$$

$$V_m^{sp} - V_m = 0 \quad (20c)$$

iii) 왼쪽 Benmore에 기계가 없다면, 단자전압은 유지하기 힘들다. 무효전력 편차는 양모선에서 일정하게 된다. 그리고, 연결 변압기 템은 자유이다.

$$\Delta Q_{m1}/V_{m1} = 0 \quad (19d)$$

$$\Delta Q_{m2}/V_{m2} = 0 \quad (20d)$$

방정식 (1)~(20)이 일반적인 동작상태에서 뉴질랜드 d.c.링크를 설명한 것이다.

4. 통합법에 의한 조류계산

고속분할법을 고려하여, 아래와 같은 공유영역 방정식은 3절에서 설명한 여러 동작 때문에 컨버터 단자에서 쓸 수 있다.

a) 유효전력편차

$$\Delta P_m/V_m = 0 \quad (\theta_m \text{에 대해서})$$

$$\Delta P_n/V_n = 0 \quad (\theta_n \text{에 대해서})$$

b) 무효전력편차

$$\Delta Q_m/V_m = 0 \quad (V_m \text{에 대해서})$$

$$\Delta Q_n/V_n = 0 \quad (V_n \text{에 대해서})$$

d.c.링크의 20개 비선형 방정식에 대한 [R]은 자코비 [A]와 d.c.링크 변수 [X]항으로 표시할 수 있다. D.C.링크 R행렬은 표 1과 같다. $R = A \Delta X$ 통합된 구조의 자코비 행렬 방정식은 식(21)과 (22)에서 보이고 있다.[18]

표 1 D.C.링크 R행렬

오 차	변수
$R_1 = V_{dm1} - k_1 a_{m1} V_{m1} \cos \phi_{m1}$	ϕ_{m1}
$R_2 = V_{dm2} - k_1 a_{m2} V_{m2} \cos \phi_{m2}$	ϕ_{m2}
$R_3 = V_{dn} - k_1 a_n V_n \cos \phi_n$	ϕ_n
$R_4 = V_{dm1} - k_1 a_{m1} V_{m1} \cos \alpha_{m1} + k_2 X_{m1} i_d$	V_{m1}
$R_5 = V_{dm2} - k_1 a_{m2} V_{m2} \cos \alpha_{m2} + k_2 X_{m2} i_d$	V_{m2}
$R_6 = V_n - k_1 a_n V_n \cos \alpha_n + k_2 X_n i_d$	V_{dn}
$R_7 = V_{dm1} + V_{dm2} - V_{dn} - R_{dc} i_d$	i_d
$R_8 = \cos \alpha_{m1} - \cos \alpha_{m1}$	$\cos \alpha_{m1}$
$R_9 = \cos \alpha_{m2} - \cos \alpha_{m2}$	$\cos \alpha_{m2}$
$R_{10} = \cos \alpha_n - \cos \alpha_n$	$\cos \alpha_n$
$R_{11} = a_{m1} - a_{m1}$	a_{m1}
$R_{12} = a_{m2} - a_{m2}$	a_{m2}
$R_{13} = a_n - a_n$	a_n
$R_{14} = P_{dm1} - V_{dm1} i_d$	V_{dm1}
$R_{15} = P_{dm2} - V_{dm2} i_d$	V_{dm2}

$$\begin{array}{c|c|c}
\begin{matrix} \cdot \\ \Delta P_k/V_k \\ \cdot \end{matrix} & \boxed{B'} & \begin{matrix} \cdot \\ \Delta \theta_k \\ \cdot \end{matrix} \\
\hline \begin{matrix} \cdot \\ \Delta P_m/V_m \\ \Delta P_n/V_n \end{matrix} & & \begin{matrix} \cdot \\ \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_n \end{matrix}
\end{array} \quad (21)$$

$$\begin{array}{c|c|c|c}
\begin{matrix} \cdot \\ \Delta \theta_k \\ \cdot \end{matrix} & \boxed{B''} & \begin{matrix} \cdot \\ B_{mn} \\ B_{nn} \end{matrix} & \begin{matrix} \cdot \\ AA'' \\ \cdot \end{matrix} \\
\hline \begin{matrix} \cdot \\ \Delta \theta_m/V_m \\ \Delta \theta_n/V_n \end{matrix} & \begin{matrix} \cdot \\ BB'' \\ \cdot \end{matrix} & \boxed{\Delta X} & \begin{matrix} \cdot \\ \Delta V_k \\ \cdot \end{matrix} \\
\hline \begin{matrix} \cdot \\ R \\ \cdot \end{matrix} & & & \begin{matrix} \cdot \\ \Delta V_m \\ \Delta V_n \end{matrix} \\
\hline & & & \begin{matrix} \cdot \\ \Delta X \\ \cdot \end{matrix}
\end{array} \quad (22)$$

여기서 k는 a.c. 시스템의 요소와 $k \neq m, n$ 을 나타낸다.

5. 3단자 동작

d.c.링크는 그림 2와 같이 3단자 형태로 구성되어 있고, 그리고 이내 15개의 방정식에 의해서 모델화시킬 수 있다.

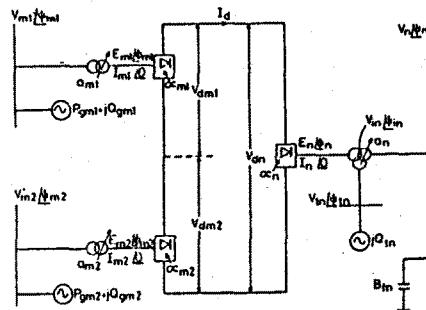


그림 2. 3단자 동작

a) 방정식(1)~(7), 그러나 $\omega_m = 0$ 로 해야 한다.

b) 왼쪽 3권 모선에서 유효전력 편차와 오른쪽 컨버터 변압기의 중간모선에서 유효·무효 전력 편차로 부터 2 방정식

c) 식(8)~(13) 그리고 (16)

d.c.링크를 통하여 일정한 유효전력을 유지하기 위해서, 무효전력 발전을 변화시키므로 발전기 단자 전압을 조정한다.

그래서 B'' 행렬에서

$$P_{dm1} - V_{dm1}I_d = 0 \quad [\Delta V_{m1} \text{에 대해서}]$$

$$P_{dm2} - V_{dm2}I_d = 0 \quad [\Delta V_{m2} \text{에 대해서}]$$

이 되고, V_m 와 V_n 을 일정하게 하는 것이 계산기 처리가 더욱 효과적이고, 모든 수렴특성은 영향을 받지 않는다.

이상 결과적으로 a.c.-d.c. 자코비 행렬은 식(23)~(25)와 같이 된다.

$$\begin{array}{c|c|c} \cdot & & \cdot \\ \Delta P_k/V_k & = & B' \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \Delta \theta_k \\ \cdot & & \cdot \end{array} \quad (23)$$

$$\begin{array}{c|c|c} \cdot & & \cdot \\ \Delta \theta_k/V_k & = & B'' \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \Delta V_k \\ \cdot & & \cdot \end{array} \quad (24)$$

$$\begin{array}{c|c|c} \cdot & & \cdot \\ R & = & A \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \Delta X \\ \cdot & & \cdot \end{array} \quad (25)$$

이 경우 변압기는 a.c. 시스템의 부분이 되고, θ_{m1} 와 θ_{m2} 은 분리된 경우와 마찬가지이다.

6. 모델 계통의 적용 및 결과 고찰

지금까지 설명한 이론에 따라 실제 현존하는 d.c.링크를 표시하여 가지고, d.c.-a.c. 연계계통의 조류계산을 하기 위해서 그림 3과 같은 모델에 적용하였다.

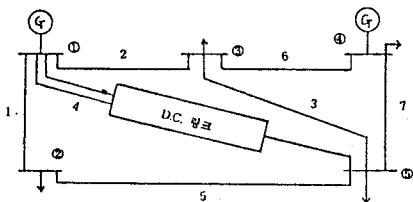


그림 3. 모델 계통

링크의 출력은 표 2와 같다.

표 2. D.C. 링크 출력

X_{m1}	X_{m2}	X_n	ϕ_{m1}	ϕ_{m2}	ϕ_m	V_{dm1}	V_{dm2}	V_d
0.07	0.07	0.12	0.291	0.290	0.166	0.668	0.668	1.332

i_d	a_{m1}	a_{m2}	a_n	V_{m1}	V_{m2}
0.075	1.0	1.0	0.5	0.516	0.516

계산결과 모선 1에서 필요한 전력은 $13.65+j21.22$ [MW]이고, 선로손실은 7.97 [MW]로서 모선 전압은 표 3와 같다.

이상에서 본 이론에 의해 현존하는 컨버터 설비의 생생한 표현을 하여 가지고, 마찬가지로 a.c.-d.c. 조류계산을 할 수 있었다.

15개의 비선형 방정식으로 이루어진 d.c.방정식이 고속분할법의 매 간격마다 사용되기 때문에 d.c.오차 수렴은 빠르게 이루어졌고, 용량은 큰 a.c.시스템에 연결될 경우 별 문제

표 3 각 모선에서 전압과 전력

모선	전 압	Generation		Load	
		P(MW)	Q(MW)	P(MW)	Q(MW)
1	1.06000	13.650	21.220	0.000	0.000
2	1.08056	0.000	0.000	0.100	0.170
3	0.99550	0.000	0.000	0.200	0.180
4	0.99300	0.400	0.300	0.190	0.340
5	1.00000	0.000	0.000	2.426	12.945

제가 되지 않을듯 하다.

7. 결 론

D.C.링크 방정식을 분명하게 수식화 시키는 것을 이용하여, 현존하는 모든 컨버터 설비를 생생하게 표현시켰다. 이것을 포함하는 전력계통에 조류계산을 하였는데 다음과 같은 중요 결론을 얻을 수 있었다.

① 15개의 비선형 방정식으로 현존하는 d.c.링크 모델을 나타낼 수 있었다.

② d.c.방정식이 고속 분할법의 매 간격마다 사용되어도, d.c.오차 수렴은 빠르게 이루어졌다.

참 고 문 헌

- [1] Lamm, U. et.al. "Some aspects of tapping of h.v.d.c. transmission systems" Direct current, Vol. 8, pp. 124-129, 1963.
- [2] Breur, G.d., "Studies of large A.C./D.C. system on the digital computer," IEEE Trans. Power Appl. syst., Vol. PAS-85, No. 11, pp. 1107-1116, 1966.
- [3] Hingorani, N.g.m Mountford, J.D., "Simulation of h.v.d.c. systems in a.c. loadflow analysis by digital computers," Proc. IEE., Vol. 113, pp. 1541-1546, 1966.
- [4] Sato, h., Arrillaga, J., "Improved loadflow techniques for integrated a.c./d.c. systems." PROC. IEE., Vol. 116, no. 4, pp. 523-532, April 1969.
- [5] Stott, B., "Load flow for a.c. and integrated a.c./d.c. systems," Ph. D. thesis, University of Marchester, 1971.
- [6] J. Arrillage et al, "Integration of h.v.d.c. links with fast-decoupled load-flows solution", PROC. IEE, Vol. 124, No. 5, 1977.
- [7] J. Arrillage et al, Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley & Sons, 1983.
- [8] C.N. Cu, S.S. Chen, C.N. Ong., "The incorporation of HVDC equations in optimal power Flow Method using Sequential Quadratic Programming Techniques," IEEE. Trans., Vol. 3, No. 3, 1988.
- [9] B. Franken, G. Anderson., "Analysis of HVDC Converters Connected to weak AC System," IEEE. Trans., Vol. 5, No. 1, 1990.
- [10] 고희석, 정형환 et al, "교류-직류 병렬송전계통의 동태 안정도에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 제40권, 제9호 pp. 851-858, 1991.
- [11] 정형환 et al "고속분할법을 이용하여 D.C.링크를 포함한 전력계통의 조류계산" 대한전기학회 논문지, Vol. 42, No. 55, pp. 52-57, 1993.