

혼잡해결을 위한 FACTS 기기의 적용과 위치선정

문준모·정유희·이광호
단국대학교 전기공학과

A Study on The Application and The Location of FACTS for Congestion Prob

Jun-Mo Moon · Yun-Ho Jung · Kwang-ho Lee
Department of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - As a competition is introduced in the electricity supply industry, a congestion problem arises in the transmission network. The congestion causes the transmission cost to increase. One way to decrease the congestion cost is to control the transmission flow through the installation of FACTS (Flexible AC Transmission system). This paper deals with the optimal site of the FACTS for reducing the congestion cost using a shadow price which is one of the economic signals for the systems. Test results show that the site of the FACTS(UPFC) is optimal to minimize the congestion cost by the proposed algorithm.

1. 서 론

최근 전력산업은 규모의 경제에 기초한 수직 통합 독점형 체제에서 기능분할에 기초한 시장경쟁체제로 변화하고 있다. 전력산업에 경쟁이 도입됨에 따라 구매자들은 가격이 낮은 발전사업자로부터 전력을 구입하려 하나 송전선로에 한계용량이 존재하므로 원하는 전력거래가 일어나지 못하는 송전선 혼잡(Transmission Congestion) 현상이 발생한다. 이로 인해 가격이 높은 발전사업자로부터 전력을 구입하게 되어 혼잡비용이 발생한다.[1]

이러한 혼잡비용을 감소시키는데 전력전자 기술을 이용한 유연송전 시스템 설비(FACTS)가 사용될 수 있다. 이러한 FACTS 설비는 선로조류를 쉽게 제어할 수 있으므로 선로조류 제어를 통한 혼잡해결에 FACTS를 활용하는 알고리즘이 제안되었다.[1][2]

혼잡이 발생할 때 전력계통에서 발전비용을 최소화하여 계통을 운영하는 방법으로 최적조류계산(Optimal Power Flow: OPF)이 사용된다. OPF 결과에는 최적발전력과 함께 라그랑지 승수로 나타나는 잠재가격(Shadow Price) 정보가 포함된다. 혼잡비용은 이러한 잠재가격 정보를 이용하여 계산되므로 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)의 최적위치 선정에 잠재가격 정보가 포함되는 연구가 수행되었다.[5]

본 논문에서는 혼잡해결을 위한 FACTS기기의 위치선정에 있어 선로조류 감도와 잠재가격 정보를 이용하여 TCSC 이외의 다른 FACTS 장치에 대해 적용하였다. 사례연구에서는 UPFC(Unified Power Flow Controller)의 경우에 적용하여 혼잡해결에 다양한 FACTS 장치가 사용될 수 있음을 검증하였다.

2. FACTS 장치의 적용

2.1 혼잡해결

전력시스템에서 전력은 선로의 열적한계, 송전계약, 선로의 소유와 상관없이 네트워크의 상황인 선로 임피던스, 부하등과 관계되어 자연적 흐름을 보인다.

그림 1에서는 자연적 전력흐름(Free Flow)과 송전용량, 혼잡을 고려한 FACTS 장치의 이용을 보여준다.[1]

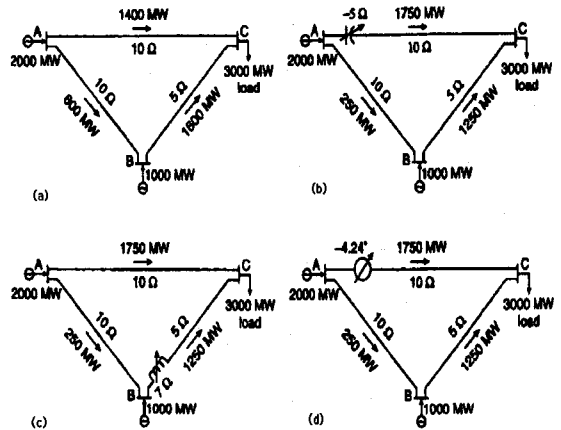


그림 1 FACTS장치가 설치된 시스템
Fig. 1 System Diagram with FACTS

그림1(a)는 송전용량을 고려하지 않았을 경우의 Free Flow이다. 이 경우는 혼잡으로 인한 송전용량의 제약을 해결하기 위해 발전력 재분배를 해야한다. 이로 인해 발전비용이 증가하기 때문에 그림1(b) TCSC, 그림1(c) TCSR, 그림1(d) TCPAR과 같이 FACTS 장치를 이용하여 혼잡선로의 전력조류와 반대로 Loop Flow를 흐르게 함으로써 혼잡현상을 해결한다.

2.2 UPFC의 정상상태 해석

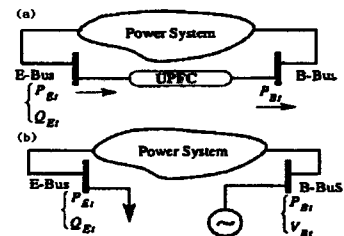


그림 2 UPFC 정상상태 모델
Fig. 2 UPFC Steady-State Model

그림2(a)는 UPFC가 포함된 전력시스템을 나타내고 그림2(b)는 정상상태에서 조류계산 모델로 분리된 모형을 보여주고 있다.[3] 이러한 모형은 UPFC가 설치된 선로의 조류 P_{Er} , P_{Br} 를 UPFC의 제어변수로 사용할 수 있음을 나타낸다.

FACTS 장치 중 대표적인 UPFC를 혼잡해결에 사용함으로써 FACTS 장치가 혼잡해결에 적용될 수 있음을 보여준다.

3. 최적 위치 선정

3.1 최적조류계산

일반적인 OPF 문제를 정식화하면 다음 식(1)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi}) \\ & \text{subject to} && \sum_{i=1}^m P_{Gi} - \sum_{i=1}^m P_{Dk} - P_L = 0 \quad (1) \\ & && F_i \leq F_i^{\max} \\ & && P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \end{aligned}$$

여기서, C_i 는 연료비함수, P_{Gi} 는 발전력, P_{Dk} 는 부하, P_L 은 송전손실, P_{Gi}^{\min} 와 P_{Gi}^{\max} 는 발전기 상한과 하한, F_i, F_i^{\max} 는 선로조류와 최대 허용용량을 나타낸다. 라그랑지 함수를 임의의 변수 X 에 대해 목적함수와 제약 조건 그리고 라그랑지 승수(λ)를 이용하여 나타내면 다음 식(2)과 같다.

$$L(X, \lambda) = f(X) + \lambda h(X) \quad (2)$$

식(2)의 라그랑지 함수에 대해 최적점(X^*)에서 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 필요조건을 적용하면 식(3)과 같고 이를 라그랑지 승수 λ 에 대해 정리하면 식(4)와 같다.

$$\Delta f(X^*) + \lambda \Delta h(X^*) = 0 \quad (3)$$

$$\lambda = - \frac{\Delta f(X^*)}{\Delta h(X^*)} \quad (4)$$

따라서 라그랑지 승수의 의미는 식(4)에서 나타나는 것처럼 제약조건의 변화에 대한 목적함수의 변화량으로 해석할 수 있다.

즉 제약조건의 한계치(선로제약)를 증가시켰을 때 최적의 목적함수(발전비용)가 얼마만큼 감소하는가를 나타낸다. 이러한 라그랑지 승수를 잠재가격이라 한다.

3.2 선로조류감도

FACTS의 제어변수와 모션전압, 선로조류의 관계는 다음 식(5)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & F_i = H(u, x) \\ & h(u, x) = 0 \\ & u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, H 는 FACTS에 대한 선로조류식, h 는 전력방정식, u 는 FACTS의 제어변수, x 는 모션전압이다.

FACTS제어에 따른 선로조류 변화식을 유도하면 다음 식(6)과 같다.[2]

$$\begin{aligned} \Delta F_i &= \frac{dH}{du} \cdot \Delta u \\ &= \left\{ \frac{\partial H}{\partial u} - \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \left[\frac{\partial h}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial h}{\partial u} \right\} \Delta u \quad (6) \\ &= [H_u - H_x h_x^{-1} h_u] \Delta u \\ &= S_{Fu} \cdot \Delta u \end{aligned}$$

여기서, $S_{Fu} = [H_u - H_x h_x^{-1} h_u]$ 는 FACTS 제어변수에 대한 선로조류 감도를 의미한다.

3.3 잠재가격 정보의 활용

선로조류 감도는 선로조류의 변화만을 고려한 것이므로 이것만으로는 비용의 최소화는 기대할 수가 없다. 잠재가격은 식(4)에서와 같이 제약조건에 대한 목적함수의 민감도이기 때문에 제약조건을 완화(Relaxation)시켰을 때 목적함수가 감소하는 정도를 나타낸다. 또한 FACTS

설치로 인한 혼잡선로에서의 조류감소를 선로제약이 완화된 것으로 볼 수가 있다. 따라서 잠재가격 정보를 이용하여 FACTS의 제어로부터 혼잡비용의 감소에 이르는 상관관계가 유도된다.

본 논문에서는 잠재가격과 선로조류 감도의 조합으로 계산되는 새로운 평가지수를 도입하여 FACTS의 최적 위치를 선정하는 기법을 제안한다. 한계비용 이론에 의한 모션 i 에서의 모션한계비용(MC_i)은 다음 식(7)과 같이 정의된다.

$$MC_i = \lambda - \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - \sum_{i=1}^m \mu_i \frac{\partial F_i}{\partial P_i} \quad (7)$$

식(7)에서 잠재가격 μ_i 이 포함된 마지막 항이 혼잡비용에 관한 부분이다. 따라서 혼잡비용(ΔC_{cong})은 전체 모션에 대한 합으로 계산되며 다음식(8.a)과 같다.

$$\Delta C_{cong} = \mu_i \sum_{i=1}^m \frac{\partial F_i}{\partial P_{Gi}} \cdot \Delta P_{Gi} \quad (8.a)$$

$$= \mu_i \Delta F_i \quad (8.b)$$

식(8.a)에서 μ_i 이후의 항은 결국 선로조류의 변화량을 의미하므로 식(8.b)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 TCSC 제어변수와 선로조류와의 관계식인 식(6)을 식(8.b)에 대입함으로써 다음식(9)이 유도된다.

$$\Delta COST = \mu_i S_{Fu} \cdot \Delta u = S_{new} \Delta u \quad (9)$$

따라서 FACTS 제어변수와 혼잡비용의 관계는 잠재가격과 FACTS의 선로조류 감도와 곱으로 나타나며 이를 새로운 평가지수로 하여 혼잡비용 최소화를 위한 FACTS의 최적 위치를 선정할 수 있는 것이다.

4. 사례 연구

사례연구로 그림1과 같은 IEEE 14모션[4]의 경우에 연료비함수가 2차($a + b P_{Gi} + c P_{Gi}^2$)일 때 UPFC에 대해 적용하였고 선로제약은 DC조류계산식을 사용하였다.

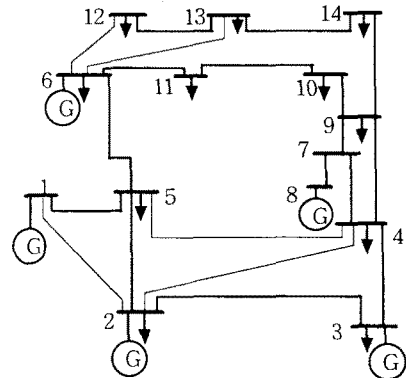


그림 3 IEEE 14모션 시스템
Fig. 3 System Diagram for IEEE 14Bus

표 1 부하 데이터
Table 1 Load Data

모션	1	2	3	4	5	6	7
부하[MW]	0.0	21.7	94.2	47.8	7.6	11.2	0.0
모션	8	9	10	11	12	13	14
부하[MW]	0.0	29.5	9.0	3.5	6.1	11.5	14.9

표 2 발전기 데이터
Table 2 Generator Data

발전기 번호	연료비 합수			상·하한[MW]	
	a	b	c	하한	상한
1	0	2.00	0.00315	10	100
2	0	1.75	0.01750	20	50
3	0	1.00	0.06250	15	80
6	0	3.25	0.00834	10	45
8	0	3.00	0.02500	10	45

표 3 선로 데이터
Table 3 Line Data

선로 번호	시작-끝 모선	리액턴스 [p.u]	최대 용량[MW]	선로 번호	시작-끝 모선	리액턴스 [p.u]	최대 용량[MW]
1	1-2	0.05917	60	11	6-11	0.19890	25
2	1-5	0.17388	60	12	6-12	0.25581	20
3	2-3	0.17632	40	13	6-13	0.13027	30
4	2-4	0.22304	25	14	7-9	0.11001	50
5	2-5	0.17103	40	15	7-8	0.17615	60
6	3-4	0.04211	30	16	9-14	0.27038	30
7	4-7	0.20912	40	17	9-10	0.08450	20
8	4-5	0.04211	40	18	10-11	0.19207	20
9	4-9	0.55618	20	19	12-13	0.19988	20
10	5-6	0.25202	50	20	13-14	0.34802	20

표1은 각 모선에서 부하, 표2는 발전기의 연료비합수와 발전량의 상·하한, 표3은 선로 리액턴스와 선로의 최대 용량을 나타내고 100MVA기준이다.

이에 대해 경제급전한 결과를 계산1이라 하고, 선로제약 조건을 포함한 OPF결과를 계산2, 선로 조류감도만을 이용하여 UPFC를 설치한 후의 OPF결과를 계산3, 제안한 알고리즘에 의해 UPFC를 설치한 이후의 OPF결과를 결과4로 구분하여 표4에 나타내었다. UPFC설치 시에 선로조류의 제어량은 ±5MW로 제한하였다.

각 계산에서의 내용과 결과를 분석하면 다음과 같다.

· 계산1 : 선로용량을 고려하지 않고 단순한 경제급전만을 수행한 결과로 발전비용은 743.031이지만 선로4, 8에서 조류가 각각 26.11, 49.96MW로 선로용량을 초과하므로 존재할 수 없는 상태이다.

· 계산2 : 선로4, 8의 혼잡현상을 해결하기 위해 OPF를 수행한 결과로 발전비용은 781.395로 결과1에 비해 38.364만큼의 비용상승, 또한 혼잡선로의 잠재가격은 OPF 수행결과로 4.1296, 6.3669로 계산된다.

· 계산3 : 선로 조류감도만을 고려해 표5에서와 같이 선로3(0.0096=0.0038+0.0058)에 UPFC의 설치 후 OPF를 수행한 결과로 발전비용이 768.051, 혼잡비용은 25.020이다.

· 계산4 : 선로 조류감도와 잠재가격 정보를 이용한 제안된 알고리즘에 의해 UPFC를 표5에서와 같이 선로10(0.0561=0.0008×4.1296+0.0083×6.3669)에 설치후 OPF를 수행한 결과로 발전비용(743.031)과 발전력이 선로제약이 없는 상태인 결과1과 동일하고 선로조류의 변화로 인해 혼잡현상이 모두 해결됨을 알 수 있다.

또한, 선로8은 최적위치로 선정되어도 Free Flow가 49.96MW이고 선로용량은 40MW로 UPFC의 제어범위를 벗어나므로 UPFC가 설치될 수 없는 위치이다.

표 4 발전력과 발전비용의 비교
Table 4 Comparison of Generation Powers and Costs

결과	PG1[MW]	PG2[MW]	PG3[MW]	PG6[MW]	PG8[MW]	발전비용	혼잡비용
계산1	100.000	50.000	29.714	45.000	34.286	743.031	0.000
계산2	100.000	46.805	43.702	23.193	45.000	781.395	38.364
계산3	100.000	50.000	38.664	25.409	44.927	768.051	25.020
계산4	100.000	50.000	29.714	45.000	34.286	743.031	0.000

표 5 최적위치에 대한 지표
Table 5 Indexes for Optimal Site of UPFC

선로번호	선로감도	선로감도+잠재가격	선로번호	선로감도	선로감도+잠재가격
1	0.0025	0.0217	11	0.0055	0.0339
2	-0.0024	-0.0211	12	0.0007	0.0042
3	0.0096	0.0526	13	0.0015	0.0093
4	0.0042	-0.0045	14	-0.0045	-0.0278
5	-0.0028	-0.0246	15	0.0001	0.0006
6	-0.0095	-0.0526	16	-0.0045	-0.0278
7	0.0045	0.0278	17	-0.0054	-0.0333
8	-0.0061	-0.0476	18	0.0055	0.0339
9	-0.0033	-0.0203	19	0.0007	0.0042
10	0.0091	0.0561	20	0.0045	0.0278

위의 계산 3, 4를 비교해보면 혼잡비용이 25.020, 0.0으로 선로 조류감도와 잠재가격으로 계산되는 새로운 평가 지수 도입 알고리즘이 UPFC의 최적위치 선정에 효과적임을 알 수 있고 다른 FACTS설비의 위치선정에도 적용될 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 송전선 개방에 따라 발생하는 혼잡비용을 감소시키는 방법에 대한 것이다. 선로에서의 부하집중이 혼잡현상을 발생시키므로 FACTS를 설치하여 혼잡선로의 조류를 제어함으로써 혼잡비용을 줄일 수 있다.

혼잡비용의 최소화를 위해 최적위치를 선정하는 데에 선로조류 감도와 잠재가격 정보를 이용하였다. 선로조류 감도는 FACTS의 제어변수에 대한 선로조류의 변화량을 나타내고 잠재가격은 선로조류변화에 대한 혼잡비용의 변화량을 나타내므로 이 두 가지의 정보를 이용한 평가 지표가 TCSC이외의 다른 FACTS 장치의 위치선정에도 적용됨을 제안하였다.

사례연구에서는 연료비 합수가 2차인 경우 UPFC에 대해 적용하였으며 잠재가격 정보가 포함된 평가지표를 이용하는 것이 효과적임을 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] M.Einhorn and R.Siddiqi, *Electricity Transmission Pricing and Tecnology*, Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [2] S. Y. Ge and T. S. Chung, "Optimal Active Power Flow Incorporating Power Flow Control Needs in Flexible AC Transmission Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.2, pp.738-744, May 1999.
- [3] A.Nabavi-Niaki, M.R.Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller(UPFC) for Power System Study", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, NO.4, pp.1937-1943, November 1996.
- [4] V.C.Ramesh, X. Li, "A Fuzzy Multi Objective Approach to Contingency Constrained OPF", Vol.12, No.3, p.1353, August 1997.
- [5] 이광호, 문준모, "혼잡비용 감소를 위한 TCSC의 최적위치에 관한 연구," 대한전기학회, 전기학회논문지, 제49A권, 5호, pp.220-225, 2000. 5.