

라그랑지 승수를 사용한 계통의 FACTS 기기 설치비용 함수의 최적화 기법

박성욱, 백영식, 서보혁
 구미대학교, 경북대학교

Optimal technique of cost function for FACTS operation in power system using Lagrange Multipliers

Seong-Wook, Park · Young-Sik, Baek, Bo-Hyeok, Seo

Abstract - The flexible AC transmissions system (FACTS) is the underpinning concept upon which are based promising means to avoid effectively power flow bottlenecks and ways to extend the loadability of existing power transmission networks. This paper proposes a method by which the optimal locations of the FACTS to be installed in power system under cost function. The optimal solution of this type of problem requires large scale nonlinear optimisation techniques. We used Lagrange multipliers to solve a nonlinear equation with equality and inequality constraints. Case studies on the standard IEEE 14 bus system show that the method can be implemented successfully and that it is effective for determining the optimal location of the FACTS

1. 서 론

전력전송망에서 전력 수송 능력의 극대화 문제는 전력 계통 해석과 산업현장에서 끊임없이 연구되고 있다. 전력 병목현상은 결국 전력전송망에서 전력 흐름이 원활하지 못해 생긴다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 기존의 전력전송망을 확충하거나 전력 제어 능력을 증가시키기 방안을 마련하여야 한다. 유연성 교류전송(FACT) 기기는 효과적으로 병목현상을 해소하고 기존의 전력망의 부하율을 증가시키는 방법으로 제안되었다[1,2]. FACTS 기기 중에서 UPFC는 전력 흐름 제어에 사용되며 모선의 전압제어 뿐만아니라 선로의 유·무효전력을 효과적으로 제어할 수 있다[3].

본 논문에서는 전력계통에 FACTS 기기를 설치할 때 최적의 위치선정 기법에 관한 연구를 수행한다. FACTS 기기의 설치비용과 FACTS 기기내의 전력흐름 제어 변수를 목적함수로 하여 계통내의 설치시 목적함수를 최소화 하는 비선형 최적 기법을 적용한다. 라그랑지 승수를 사용하여 비선형 식의 항등 제한조건과 부등 제한 조건식을 만족하는 목적함수의 변수를 구하고 이를 토대로 FACTS 기기의 최적 위치를 선정한다. 본 연구를 2장에서는 UPFC의 모형식을 다루고 3장에서는 목적함수와 변수 및 제약조건을 다룬다. 제 4장에서는 비선형 해를 구하는 절차와 사례연구하고 마지막 장에서는 결과 검토와 결론에 대해 서술한다.

2. FACTS의 모형화

FACTS 기기는 전력 흐름 제어에 사용되고 표 1과 같이 분류된다. 그림 1은 FACTS 기기 중 가장 널리 사용되는 UPFC의 등가회로를 나타낸다. U_T, ϕ_T 그리고 I_q 는 독립제어 변수이고 아래와 같은 범위를 가진다.

표 1 FACTS 기기의 분류

FACTS 분류	제어변수	FACTS 기기
A형	직렬 $\overline{P}, \overline{Q}$	UPFC
B형	직렬 \overline{P}	TCSC, 위상각 제어
C형	병렬 \overline{Q}	SVC, STACOM

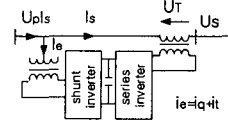


그림 1. UPFC의 등가회로

$$\Gamma = U_T, \phi_T, I_q \mid U_T \in [0, U_{Tmax}], \phi_T \in [0, 2\pi], I_q \in [-I_{qmax}, I_{qmax}]$$

여기서 U_{max}, I_{qmax} 는 UPFC의 정격을 나타낸다. 그림 1에서 UPFC는 두개의 인버터 전압원과 DC 캐패시터로 연결되어 있고 병렬 인버터는 p 모선과 연결되어 모선전류를 제어하는 전류원으로 사용되고 직렬인버터는 s모선사이에 설치되어 전송선로에 투입된 전압원으로 동작한다. 이상 전류원 (I_o)는 유효전류 (I_i)와 무효전류 (I_q)로 구성된다. I_o 는 모선 전압을 일정하게 유지하고 I_i 는 직렬 전압원 (U_T)의 조건을 결정하므로 UPFC의 정격은 병렬 인버터의 용량에 의해 결정된다.

3. 목적함수 설정

UPFC를 설치하면 설치비용과 효과를 기본적으로 고려하여야 한다. 전력계통의 설치시 설치비용과 설치할 경우의 손실 마진을 함께 고려해야 한다. UPFC의 설치비용은 정격전압과 전송선로의 최대전류의 크기와 비례상수로 곱으로 나타낼 수 있다.

$$C_{UPFC} = \sum_{i=1}^{n_i} (F_i + \alpha_i U_{Tmax} + \beta_i I_{qmax}) \quad (1)$$

여기서 n_i 는 UPFC의 수를 나타내고 F_i 는 설치비용으로 전기적 성질에 관계없는 일정상수이다. α_i 은 직렬 인버터의 용량에 관계되는 비례상수로 원xkA/MVA로 표기할 수 있다. β_i 은 병렬 인버터내의 리액터 보상의 크기에 관계되는 비례상수로 원xkV/MVA로 표기한다. UPFC의 설치는 모션간에 전력손실이 생겨 전력계통의 운영상 손실로 작용하므로 아래와 같이 전력손실을 고려한다.

$$C_{loss} = \sum_{k=1}^{n_k} \gamma^{(k)} \sum_{i=1}^{n_i} [P_{ij}^{(k)} + P_{ji}^{(k)}] \quad (2)$$

$$C(X) = C_{upfc} + C_{loss} \quad (3)$$

여기서 X 는 목적함수의 변수로 다음과 같다.

$$X = [U_{Tmax}^T, I_{qmax}^T, Q_G^{(1)}, U_T^{(1)}, I_q^{(1)T}, \phi^{(1)T}, U^{(1)T}, Q_G^{(2)}, U_T^{(2)}, I_q^{(2)T}, \phi^{(2)T}, U^{(2)T}]^T \quad (4)$$

여기서 $U_{Tmax} = [U_{T1max}, U_{T2max} \dots U_{Tnmax}]^T$,

$I_{q1max} = [I_{q1}, I_{q2max} \dots I_{qnmax}]^T$ 이다. U_{TB} 는 UPFC가 설치할 필요가 있는지를 결정하는 변수이다. 만약에 $U_{Tmax} < U_{TB}$ 면 l 번째 UPFC기기를 설치할 필요가 없다. $t^{(k)}$ 는 부하 탭 전환 변압기를 나타낸다.

$$t^{(k)} = [t_1^{(k)}, t_2^{(k)}, \dots, t_n^{(k)}]^T \quad k=1, 2, \dots, n_c$$

동시에 발전기의 무효전력 $Q_G^{(k)}$, UPFC 기기의 변수 $U_T^{(k)}, I_q^{(k)}, \phi^{(k)}$ 가 변수에 포함된다. $U^{(k)}$ 는 모선의 전압과 각을 나타낸다. 단 슬랙모선의 전압 각은 0으로 한다.

3.1. 질 제약조건

UPFC에 의해 제어되는 계통을 해석하기 위해 로드 플로우에 항등 제약조건을 적용하면 아래와 같다[4].

$$P_G^{(k)} - P_L^{(k)} = \sum_{i \in I} U_i^{(k)} U_j^{(k)} [G_{ij}^{(k)} \cos \delta_j^{(k)} + B_{ij}^{(k)} \sin \delta_j^{(k)}] + \bar{P}_{ij}^{(k)} \quad (5)$$

$$i=2, 3, \dots, n, \quad k=1, 2, \dots, n_c$$

$$Q_G^{(k)} - Q_L^{(k)} = \sum_{i \in I} U_i^{(k)} U_j^{(k)} [G_{ij}^{(k)} \sin \delta_j^{(k)} - B_{ij}^{(k)} \cos \delta_j^{(k)}] + \bar{Q}_{ij}^{(k)} \quad (6)$$

$$i=2, 3, \dots, n, \quad k=1, 2, \dots, n_c$$

여기서 $\bar{P}_{ij}^{(k)}$ 와 $\bar{Q}_{ij}^{(k)}$ 는 선로에 설치된 UPFC에 의해 모선 ij 간에 제어되는 전력을 나타낸다.

$$\bar{P}_{ij}^{(k)} = -U_j^{(k)} U_{ij}^{(k)} [G_{ij} \cos(\delta_j^{(k)} - \phi_{ij}^{(k)}) - B_{ij} \sin(\delta_j^{(k)} - \phi_{ij}^{(k)})] + (G_{ij} + g_{ij}) U_{ij}^{(k)} [U_j^{(k)} + 2U_{ij}^{(k)} \cos(\delta_j^{(k)} - \phi_{ij}^{(k)})] \quad (7)$$

다른 제약조건으로 발전기의 전압, 발전기의 무효전력, LTC 탭비 그리고 UPFC의 동작조건이 있다.

4. 사례연구

UPFC의 크기와 최적위치에 관한 문제는 아래와 같은 목적함수와 제약조건을 풀어서 해를 구할 수 있다.

$$\text{objective:} \quad \min C(X)$$

$$\text{subjective to:} \quad h_j(X) = 0 \quad j=1, 2, \dots, n_h$$

$$g_j(X) \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n_h$$

$$e_{km} < e_j(X) < e_{jm} \quad j=1, 2, \dots, n_h$$

여기서 $h_j(X)$, $g_j(X)$ 와 $e_j(X)$ 는 항등 제약조건과 부등 제약조건을 나타내고 e_{jm}, e_{jm} 은 부등 제약조건 of 최저치와 최고치를 나타낸다. 전력계통에 설치된 UPFC의 동작조건중에서 위의 목적함수와 제약조건을 만족하는 X 를 구하기 위해 다음의 절차과정으로 해를 구한다.

Step 1: IEEE 14모선의 데이터 입력

Step 2: load flow와 제약조건

Step 3: gradient 함수를 이용하여 라그랑지 계산

Step 4: 비용함수와 최적변수 구함

4.1. 질 사례연구

사례연구로 IEEE14모선을 사용하였고 UPFC의 초기 설치위치를 그림으로 나타내면 아래와 같다.

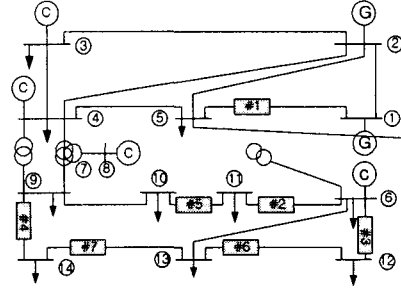


그림 2. 7개의 UPFC 기기와 IEEE 14모선

7개의 설치가능한 장소를 후보지로 하여 두개의 부하 조건하에 최적의 후보지를 선정하고자 한다. 두 경우의 과부하조건을 시라니오하여사래연구한다. 선로에 흐르는 전류는 각 부하당 1.693, 1.619이다. UPFC가 설치되기 전의 로드 플로우가 표 1에 나타내었다. 첫 번째 부하조건에서 슬랙버스의 무효전력 발전량이 한계를 넘었고 모선 5번과 6번 사이에 심각한 과부하가 표 2를 통해 알 수 있었다.

표 1 부하조건에 따른 IEEE 14모선의 로드 플로우 결과

bus	$P_G^{(1)}$	$Q_G^{(1)}$	$P_G^{(2)}$	$Q_G^{(2)}$	Q_{max}	Q_{min}
1	2.587	-0.484	2.174	-0.434	1.45	-0.45
2	0.800	0.2016	1.200	0.0072	0.50	-0.40
3	0.000	0.400	0.000	0.400	0.40	0.00
4	0.000	0.9643	0.000	0.9794	1.00	-0.30
6	0.000	0.240	0.000	0.240	0.24	0.06
8	0.000	0.0599	0.000	0.0884	0.24	0.06

i	j	$I_{ij}^{(1)}$	$I_{ij}^{(1)}$	$I_{ij}^{(2)}$	$I_{ij}^{(2)}$	I_{lim}
5	6	0.944	0.944	0.6606	0.6606	0.65
4	7	0.4764	0.4764	0.6486	0.6486	0.65
4	9	0.2742	0.2742	0.3734	0.3734	0.4
1	2	1.8809	1.8645	1.5207	1.5042	3.42
2	3	0.9012	0.8927	0.9233	0.9148	1.71
2	4	0.9142	0.9026	0.9605	0.9489	1.71
5	1	0.7741	0.7755	0.7127	0.7153	1.71
2	5	0.7734	0.7669	0.7824	0.7741	1.71
3	4	0.0895	0.0874	0.0731	0.0662	1.71
4	5	0.7269	0.7365	0.8099	0.8170	1.71
7	8	0.0599	0.0599	0.0884	0.0884	0.5
7	9	0.4829	0.4829	0.6587	0.6587	0.65
9	10	0.2167	0.2167	0.1704	0.1704	0.5
11	6	0.0423	0.0423	0.1628	0.1628	0.65
12	6	0.2061	0.2061	0.1227	0.1227	0.65
6	13	0.4171	0.4171	0.3811	0.3811	0.65
9	14	0.2427	0.2427	0.1480	0.1480	0.5
10	11	0.1980	0.1980	0.1103	0.1103	0.5
13	12	0.0575	0.0575	0.0505	0.0505	0.5
14	13	0.0750	0.0750	0.1435	0.1435	0.5

표 2 선로에 흐르는 전류와 한계치

4.2. 질 UPFC의 설치 후보 결정

UPFC는 아래와 같은 방식으로 후보지를 선정하였다.

(가)한 모선이나 한 선로에만 설치

(나)전송선로가 임피던스가 비교적 작은 곳을 설치를 피함

(다)발전기나 보상에 의해 쉽게 제어되는 선로는 피함

위의 조건에 따라 7개의 선로에 UPFC를 설치하고 각 장소에 대한 설치비용 가중치는 표 3 같다.

표 3 UPFC의 설치비용 가중치

UPFC #	i	j	α	β
1	5	1	5.0	10.0
2	11	6	3.5	7.5
3	12	6	4.0	7.0
4	9	14	2.5	6.0
5	10	11	3.0	6.0
6	13	12	3.0	6.4
7	14	13	3.0	6.5

Advances in power system control, operation & management, IEE , Hong Kong, pp. 383-388, November 1997.

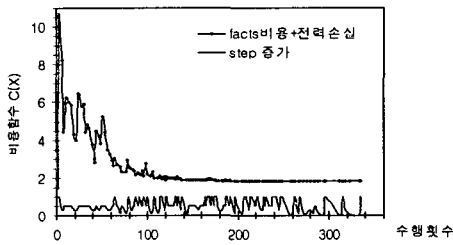


그림 3. 랑그랑지 승수를 사용한 비용함수의 최적화

4.3. 절 계산 결과

최적의 위치 선정을 위해 로드 플로우를 풀면서 60개의 부등 제약조건을 만족하도록 하였다. 부등 제약식은 FACTS 7개의 전압(7), 전류(7), 전압각(7) 그리고 탭의 값(3), 발전기와 동기 보상기의 전압(6)으로 총 30개로 2개의 부하조건을 고려하여 $C(X)$ 의 X 을 구하였다.

$$0.00001 < \text{Vlm} < 0.5, \quad -0.2 < \text{Imag}(Iq) < 0.2, \\ -\pi/4 < \text{전압각} < \pi/4$$

$$0.9 < \text{ltc} < 1.1, \quad 0.9 < \text{발전기, 동기 보상기} < 1.1$$

계산 결과, 6번의 수행에서 1 21 26 31 62 63 제약에 걸려고 2번, 3번에서 가장 좋은 결과가 있었다. 계산시간은 삼성 sens 830으로 총 5864.7초 걸렸다.

5. 결 론

본 연구에서는 모의 전력계통에 FACTS 기기를 설치하여 전력흐름을 원활이 제어할 때, 최적 기법을 적용하여 비용함수의 변수를 최소화하는 조건의 설치 위치를 찾았다. 제약조건에 걸리면 결과를 출력하고 로드플로우식에 제약조건을 반영하도록 하였다. 최적화 방법에서 gradient 방법을 적용한 경우와 한한 경우도 사례연구하였다. 목적함수의 정의식에 따라 값이 발산하는 경우도 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] GYUGYI, L. "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission system", IEE Proc. C. vol. 139, no. 4, pp. 323-331, 1992.
- [2] 박성욱, 서보혁, "계통의 안정성을 고려한 비선형 FACT S 신경망 제어기 설계", 대한 전기학회 논문지, 51호, P권, pp. 211-218, 2002. 12.
- [3] FUERTE-ESQUIVEL, C.R., and ACHA, E, "Unified power flow controller: A critical comparison of Newton-Raphson UPFC algorithm in power flow studies", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 144, no. 5, 1997.
- [4] FANG, W., and NGAN, H.W.: 'Extension of Newton Raphson load flow techniques to cover multi unified power flow controller,' Proceedings of the 4th international conf. on