

## FACTS 기기의 최적 위치 및 용량 산정에 관한 연구

송화창 · 이병준  
고려대학교 전기전자전파공학부

### A Study on Evaluation of optimal FACTS location and capacity

Hwachang Song · Byongjun Lee  
School of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - In recent deregulation and competitive power market environment, electric utilities plan and operate their systems for economic benefit with secure system condition. Therefore, implementation of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices can be planned for the efficient utilization of the present system facility. This paper presents a technique to solve the problem about optimal allocation of FACTS devices for the purpose of enhanced system operation.

#### 1. 서 론

최근 우리나라의 전력계통은 제어능력 향상 및 송전능력 증대를 위해 유연송전기기를 계통에 도입하는 방안을 추진하고 있다. 전력계통의 제어능력 향상이라는 기본 목적외에 규제완화 환경에서 중요한 요소인 경제성 확보라는 목적을 달성하기 위해서도 유연송전 기기의 필요성은 점차 증대하고 있다고 볼 수 있다. 계통계획자가 유연송전기기의 도입을 위해서는 계통의 수송능력 향상과 경제성 확보라는 목적하에 투입형태에 따른 유연송전기기의 종류와 투입위치 및 투입용량의 세가지 사항을 검토하여야 한다. 본 논문에서는 전력계통의 송변전 설비 계획단계에서 계획자가 유연송전 기기의 계통도입을 위해 필요한 최적위치 및 용량에 관한 검토를 위하여 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

유연송전기기의 최적위치와 용량을 산정하기 위한 기준은 계통의 운전제약범위 내에서 투입될 유연송전기기의 용량과 계통손실을 최소화하는 것이 된다. 이러한 문제는 목적함수를 최소화하는 해를 찾는 최적화 형태로 표현되며 일반적으로 비선형 혼합정수계획법 (MINLP, Mixed Integer Nonlinear Programming)으로 분류된다. MINLP 문제를 푸는 해법은 일반적으로 Benders 분해법 [1]과 Outer Approximation(OA) 법[2]이 이용되고 있는데, 본 논문에서는 Benders 분해법을 이용하여 전체문제를 손실최소화의 부문제와 유연송전기기 투입용량 최소화의 부문제로 나누어 풀어나가는 알고리즘을 적용하고자 한다. 부문제인 손실최소화는 대형계통의 최적화문제에 유용한 순차선형계획법(SLP, Successive Linear Programming)[3]을 이용하게 된다.

본 논문에서는 병렬형 유연송전기기중 요즘 많은 관심을 받고 있는 STATCOM(STATIC synchronous Compensator)을 선택하였으며, STATCOM의 정적인 모델을 조류계산 알고리즘에 포함시킨 후 IEEE 30모선 시험계

통에 적용하여 최적위치와 적정용량을 산정하는 방안에 대한 구체적인 사례를 보이고자 한다.

#### 2. 문제의 구성

##### 2.1 목적함수

본 논문에서 STATCOM 투입을 고려할 때, 최적 위치 및 용량을 산정하기 위한 목적함수로 계통 손실 및 투입용량의 최소화를 고려한다. 목적함수는 다음 식 (1) 과 같이 표현될 수 있다.

$$\min f = \rho P_{\text{loss}} + \sum S_{\text{STAT},i} \cdot r_i \quad (1)$$

식 (1)에서  $P_{\text{loss}}$ 는 계통 유효전력 손실에 해당하고  $\rho$ 는 목적함수를 최소화하는 데 있어 손실감소에 가중치를 두기 위한 상수가 된다.  $S_{\text{STAT},i}$ 는  $i$ 번째 모선에 투입되는 STATCOM의 용량에 해당하고  $r_i$ 는  $i$ 번째 모선에서 STATCOM의 투입여부를 결정하는 정수이다. 식 (1)에서 이용되는 계통손실은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^L G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2)$$

여기에서  $L$ 은 선로의 총 개수이며  $i, j$ 는  $k$ 번째 선로와 연결된 모선 번호에 해당된다.  $G_{ij}$ 는  $k(i-j)$ 번째 선로의 conductance에 해당하고  $V_i, V_j$ 는 각각  $i$  모선과  $j$  모선의 전압크기,  $\delta_i, \delta_j$ 는 전압위상각에 해당한다.

그러면 식(1)에서 두번째 항에 해당하는 STATCOM의 용량을 알아보자. STATCOM은 투입 모선전압을 유지하기 위하여 모선전압과 90° 위상차를 갖는 전류를 병렬로 주입하여 무효전력을 공급하거나 소모한다. 그림 1에서 STATCOM의 V-I 특성을 나타내고 있다.

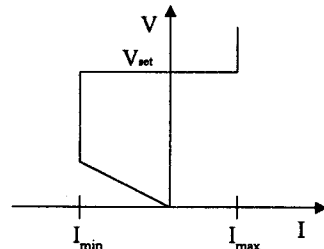


그림 1. STATCOM의 V-I 특성

이 그림에서 STATCOM은 주입 전류의 상하한 값을 갖게 되고 이 값에 의하여 투입되는 STATCOM의 용량이 결정되게 된다.  $i$ 번째 모선에 투입되는 STATCOM이

$I_{max,i}$ 의 주입전류 상하한을 가지고 있고  $V_{set,i}$ 의 정상전압에서 운용되고 있을 때, STATCOM의 용량은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$S_{STAT,i} = V_{set,i} I_{max,i} \quad (3)$$

그러면 본 문제의 제약조건에 대하여 알아본다.

### 2.2 제약조건

본 문제에서의 제약조건은 교류조류 방정식에 해당하는 등호제약과 발전기 모션 전압  $V_G$ , 변압기 탭  $t$ , 그리고 STATCOM의 주입전류  $I_{STAT}$  등의 제어변수의 상하한 제약과 부하모션 전압  $V_L$ , 발전기 무효전력  $Q_G$ 에 해당하는 피제어 변수의 상하한 제약이 있으며 이들은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$P_{Ti}(\delta, V_L, V_G, t) = P_{Ti} \quad (4.a)$$

$$Q_{Ti}(\delta, V_L, V_G, t) - Q_{STAT,i}(V_i) = Q_{Ti}$$

$$V_{G,min} \leq V_G \leq V_{G,max}$$

$$t_{min} \leq t \leq t_{max}$$

$$V_{L,min} \leq V_G \leq V_{L,max} \quad (4.b)$$

$$Q_{G,min} \leq Q_G(\delta, V_L, V_G, t) \leq Q_{G,max}$$

$$I_{STAT,min} - \Delta I^T r \leq I_{STAT} \leq I_{STAT,max} + \Delta I^T r$$

여기에서  $\Delta I$ 는 투입되는 STATCOM의 주입 전류한계에 대한 증분에 해당한다.  $r$ 은 목적함수에서 투입여부를 결정하는 정수를 하나의 벡터로 표현한 것으로 STATCOM의 설치가능한 모션 수가  $m$ 이라고 했을 때  $r=[r_1 \ r_2 \ \dots \ r_m]^T$ 이다.

### 3. Benders 분해법의 적용

앞 절에서 구성한 문제는 목적함수 및 제약조건에서 비선형성을 가지고 있고 투입여부를 결정하는 정수가 변수로 포함되어 있으므로 이 문제는 MINLP 형태의 문제에 해당된다. 본 논문에서는 Benders 분해법을 적용하여 손실 최소화 부문제와 STATCOM 추가 투입량을 결정하는 부문제로 나누어 최적해를 구하는 알고리즘을 제시한다.

#### 3.1 부문제

Benders 분해법의 기본적인 적용은 다루기 어려운 변수(complicating variables) - 본 문제에서는 정수  $r$ 에 해당한다 - 를 고정시키면 문제가 쉬운 문제로 바뀌는 점을 이용하는 것으로부터 시작된다. 식 (1)의 목적함수와 식 (4)의 제약조건에서의 정수 벡터  $r$ 을 임의의 값  $r^*$ 으로 고정시키면 다음과 같은 표현된다.

$$\min f_1 = \rho P_{loss} + \sum_i S_i r_i^*$$

$$\text{s.t. } g(x) = 0$$

$$h(x) \geq 0 \quad (5)$$

$$I_{STAT,min} - \Delta I^T r^* \leq I_{STAT} \leq I_{STAT,max} + \Delta I^T r^* \quad \lambda$$

여기에서  $g(x) = 0$ 은 식 (4.a)에 해당하는 등호제약을 간단히 표현한 것으로  $x=[\delta \ V_G \ V_L \ t]^T$ 이다.  $h(x) \geq 0$ 은  $I_{STAT}$ 의 상하한 제약을 제외한 부등호 제약조건에 해당한다. 그리고  $\lambda$ 는  $I_{STAT}$ 의 상하한 제약에 해당하는 쌍대변수(dual variable)이다.

식 (5)로 표현되는 문제는 비선형계획(NLP, Nonlinear Programming) 문제에 해당한다. 본 논문에서는 이 문제를 풀기 위하여 실행가능영역에서의 안정적인 수렴성을 갖는 순차선형계획법(SLP)을 이용하였다.

순차선형계획법을 적용하기 위하여서는 먼저 조류계산 방정식에 정적인 STATCOM 모델이 적용되어야 한다. STATCOM이  $i$ 번째 모션에 투입되었을 때의 무효전력

조류 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{Ti}(\delta, V_L, V_G, t) + Q_{Li} - Q_{STAT,i}(V_i) - Q_G = 0 \quad (6)$$

$$Q_{STAT,i}(V_i) = V_i \cdot I_{STAT}$$

STATCOM의 주입전류  $I_{STAT,i}$ 가  $I_{STAT,i}$ 로 고정된 값을 갖을 때, 위 식을  $V_i$ 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\partial Q_{Ti} / \partial V_i - I_{STAT,i} = 0 \quad (7)$$

따라서 STATCOM이 투입 되었을 때, 전력조류 자코비안은 위 식과 같이 계산되어야 한다. 본 논문에서는 참고문헌 [3]에서 제안하고 있는 소성(sparsity)을 가지고 있는 전력조류 자코비안을 그대로 이용하는 감도행렬로 이용하는 순차선형계획법을 이용하므로 STATCOM 투입에 따른 감도행렬의 변화를 고려할 필요가 없다.

#### 3.2 부문제

연속선형계획법을 통하여 계산된 최적해에서의  $I_{STAT}$ 의 부등호 제약에 해당하는 쌍대변수  $\lambda$ 는 STATCOM 투입을 결정하는 부문제에 중요한 정보를 제공한다.  $\lambda$ 는 부문제의 최적해에서  $I_{STAT}$ 의 부등호 제약이 단위량 변화하였 때, 부문제의 목적함수 즉 계통손실이 변화하는 정도를 나타내고 있다. Benders 분해법에서는 이  $\lambda$  값을 이용하여 Benders cuts이라고 불리는 부문제의 제약을 구성한다.  $I_{STAT}$ 이 1차원일 때, Benders cuts의 개념을 그림 2에서 보여주고 있다.

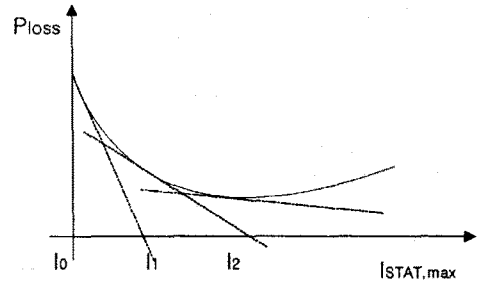


그림 2 Benders cuts의 개념

위 그림에서 세개의 점선의 기울기는  $I_{STAT,max}$ 가  $I_0, I_1, I_2$ 이었을 때의 부문제에서 이 제약에 대한 쌍대변수의 최적값에 해당하고 각 투입상태에서의 STATCOM 추가 투입에 대한  $P_{loss}$ 의 감도를 나타낸다.  $k$ 번째 부문제 계산 후,  $k$ 번째까지의 쌍대변수 및 계통손실에 관한 정보를 가지고 구성되는  $k+1$ 번째 STATCOM 투입 결정의 부문제는 다음과 같은 목적함수와 제약조건을 갖는다.

$$\min f_2 = \rho \frac{P_{loss}^{k+1}}{\lambda} + \sum_i V_{set,i} \Delta I_i^k + I_i^{k+1}$$

$$\text{s.t. } \frac{P_{loss}^{k+1}}{\lambda} \geq P_{loss}^0 + \sum_i \lambda_i^0 (\Delta I_i^0 - \Delta I_i^0)$$

$$\frac{P_{loss}^{k+1}}{\lambda} \geq P_{loss}^1 + \sum_i \lambda_i^1 (\Delta I_i^1 - \Delta I_i^1)$$

$$\frac{P_{loss}^{k+1}}{\lambda} \geq P_{loss}^k + \sum_i \lambda_i^k (\Delta I_i^k - \Delta I_i^k)$$

$$j = 0, 1, \dots, k$$

$$r_k = 0 \text{ or } 1 \quad (8)$$

식 (8)  $\frac{P_{loss}^{k+1}}{\lambda}$ 은  $k+1$ 번째 투입 후, 예상되는 계통손실에 해당하고 이 문제에서 혼합정수계획법(MILP)을 통하여 결정되어야 하는 변수는  $\Delta I_i^{k+1}, r_i^{k+1}$ 이다.

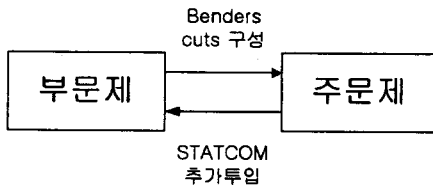


그림 3 Benders 분해법의 개념

그림 3에서 Benders 분해법의 주문제와 부문제에서 주고 받는 정보에 대하여 설명하고 있다. 부문제에서는 주문제의 제약조건을 구성할 수 있도록 쌍대변수 및 계통손실등의 Benders cuts을 구성할 수 있는 정보를 주고 주문제에서는 STATCOM의 추가투입에 관한 정보를 부문제에 준다. 이 두 문제에서의 목적함수  $f_1$ 과  $f_2$ 의 값의 차가 수렴허용한계내에 존재하면 최적투입량에 도달했다고 판단하고 두 문제의 반복을 중단한다.

#### 4. 사례연구

앞에서 제시한 알고리즘을 IEEE 30모선 계통에 적용하여 STATCOM의 최적 위치 및 용량을 산정하여 보았다. IEEE 30 모선계통은 6개의 발전모선, 18개의 부하모선, 그리고 6개의 중간모선을 가지고 있고, 41개의 선로와 4개의 변압기가 있는 계통으로 무효전력 투입계획 연구에 많이 적용된 바 있다. 초기 상태에서의 계통 손실은 6.05733[MW]로 계산되었다. 본 사례연구에 적용한 부하모선 전압 제약, 발전기 모선전압 제약, 그리고 변압기 탭 상하한 제약이 표 1에서 나타내고 있다.

표 1 본 사례연구에서의  $V_L$ ,  $V_G$ ,  $t$ 의 상하한 제약

부하모선 전압 상하한	0.950 ~ 1.050[pu]
발전기 모선전압 상하한	0.990 ~ 1.010[pu]
변압기 탭 상하한	0.910 ~ 1.100[pu]

본 사례연구에서는 모든 부하모선이 STATCOM 설치 후보지로 선택되었다고 가정하였고, 식 (1)에서의 계통손실에 대한 가중치  $\rho$ 는 1000으로 선정하였다. 그리고 STATCOM 투입 시 정상전압  $V_{set}$ 은 1.00[pu]로 선택하였다.

STATCOM의 최적 위치 및 용량 산정을 위한 프로그램을 수행한 결과 최적해에 수렴하는 데, 10회 반복회수를 보였다. 표 2에서 본 논문에서 제시한 알고리즘을 IEEE 30모선 계통에 적용하였을 때 계산된 STATCOM의 최적 위치 및 최적 용량을 보이고 있다. 그리고 최적해에서의 계통손실은 5.82715[MW]로 계산되었다.

표 2 STATCOM의 최적 위치 및 최적 용량

모선 번호	최적 용량	모선 번호	최적 용량
21	3.60[MVar]	12	2.20[MVar]
3	3.80[MVar]	14	2.82[MVar]
4	3.80[MVar]	15	3.90[MVar]
6	0.40[Mvar]	23	3.80[MVar]
7	3.00[MVar]	26	0.80[MVar]

표 2의 결과를 참고문헌 [4]에서 소개하고 있는 무효전력 투입계획을 적용한 결과와 비교하였을 때, 다른 점을 보이고 있다. IEEE 30모선의 6개의 취약모선 (17,19,21,24,30,3)을 미리 후보지로 정한 뒤, 무효전력 상한의 값을 5[MVar]으로 선택하여 순차선형계획법을 통하여 최적 용량을 산출한 뒤, 무효전력원이 더 필요한 모선의 경우 증설용량을 산정한다. 표 3에서 무효전력 투입계획을 적용하였을 때, 투입 모선 및 용량을 보이고 있다. 이 때 최종상태에서의 계통 손실은 5.9248[MW]로 계산되었다.

표 3 다단계 투입방안에 따른 투입 모선 및 용량

투입모선	투입용량	투입모선	투입용량
17	3.5091[MVar]	24	1.3871[MVar]
19	3.1868[MVar]	30	3.3796[MVar]
21	4.1789[MVar]	3	15.6703[MVar]

표 3의 결과를 본 논문에서 제시한 STATCOM의 최적 위치 및 최적 용량 산정을 위한 알고리즘을 적용한 결과와 비교하여 보면 다단계 투입방안에서는 무효전력원을 투입하는 모선이 6개로 계산된 반면 본 알고리즘을 적용한 경우에는 STATCOM이 10개의 모선에 투입되어야 하는 결과를 보이고 있지만 투입 용량과 투입 후 계통 손실은 작은 값을 보여 좀더 효과적으로 최적 위치 및 용량이 선정되고 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 전력계통의 송변전 설비 계획단계에서 계획자가 유연송전 기기의 계통도입을 위해 필요한 최적 위치 및 용량을 산정하는 알고리즘의 개발을 위한 첫 단계로서, 계통손실 최소화를 목적으로 하여 병렬 유연송전 기기인 STATCOM의 최적 투입 위치 및 용량을 결정하는 알고리즘을 제시하였다. MINLP 형태의 본 문제를 Benders 분해법을 적용하여 NLP 형태의 계통손실 최소화 부분제와 MILP형태의 STATCOM 투입 결정의 주문제로 풀기 쉬운 형태로 나누어 최적해를 구하였다. 또한 NLP의 부분제를 수렴성이 강한 SLP법을 적용하여 전력조류 자코비안을 그대로 이용하기 때문에 정적인 STATCOM 모델을 이 문제에 쉽게 적용할 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

[1] A. M. Geoffrion, "Generalized Benders Decomposition", Journal of Optimization Theory and Application, Vol. 10, No. 4, 1972.  
 [2] M. A. Duran, I. E. Grossmann, "An Outer Approximation Algorithm for a Class of Mixed-Integer Nonlinear Programs", Mathematical Programming, Vol. 36, 1986, pp. 307-339.  
 [3] P. Ristanovic, "Successive Linear Programming Based OPF Solution", IEEE Turoial course 96TP111-0 - Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirements, and Challenges, 1996, pp. 1-9.  
 [4] K. Iba, H. Suzuki, K-I Suzuki, K. Suzuki, "Practical Reactive Power Allocation/Operation Planning Using Successive Linear Programming", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.