

수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입계획에 관한 연구

임남규 · 송화창 · 이병준
고려대학교 전기전자전파공학부

Optimal Allocation of FACTS Devices Considering both Corrective and Preventive Mode

Namkyu Lim · 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. Flexible AC transmission system(FACTS) technology opens up new opportunities of controlling power and enhancing the usable capacity of present transmission system. This paper presents a method for security constrained optimal allocation of FACTS considering contingencies for the purpose of enhanced system operation. The proposed scheme uses Benders decomposition to account of both corrective and preventive mode.

른 안전성 측면의 목적함수, 그리고 투입용량을 최소화하는 다음 식(1)로 표현된다.

$$\min f = \sum_{n=1}^{nc} f_{0n} + \sum_j S_{FS,j} \cdot r_j \quad (1)$$

$$f_{0n} = \alpha P_{loss,n} + f_{FS,n}$$

- 여기서, P_{loss} : 계통손실
- n : n번째 계통상태
- S_{FS} : 투입량
- α : 손실감소 가중치 계수
- $f_{FS,n}$: 투입된 유연송전기기에 따른 목적함수
- r_j : 투입여부를 결정하는 정수

1. 서 론

최근 전력계통은 전원의 원격화와 부하의 집중화에 의해 송전설비가 장거리·대용량화되고 있다. 또한 우리 나라도 전력산업 구조개편에 따른 경쟁체제의 도입을 준비중에 있다. 이에 따라 계통의 안전성확보 및 경제적인운용을 위한 송전계통의 운용 효율개선이 필요하게 되었다. 이러한 요구에 부응하여 전력전자 기술을 이용한 유연송전기기(FACTS)에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔고, 현재는 계통 적용단계에 이르고 있다.

일반적인 유연송전기기의 최적위치와 용량산정계획은 건전상태 계통에서 안전도 제약을 만족하면서 비용을 최소화하는 최적화 문제의 형태이다. 계획문제에서 안전도 제약을 고려한다는 것은 (n-1) 상정사고의 계통상태들을 계획문제에 포함시키는 것을 의미한다. 각 계통상태마다 필요로 하는 유연송전기기 투입량은 다르기 때문에 다양한 계통상태를 표현하는 것은 계획단계에서 매우 중요하다. (n-1) 상정사고의 영향을 고려한 확장된 유연송전기기 최적투입계획은 상정사고 후에 취하는 조치형태에 따라 수정모드와 예방모드로 구분된다. 본 논문에서는 수정모드(corrective mode)와 예방모드(preventive mode)를 동시에 고려하여 건전 상태 및 고려하는 상정 상태에서 각 제약조건을 만족하는 최적해를 구하는 알고리즘을 제시한다.

본 논문에서는 혼합정수비선형계획으로 표현되는 유연송전기기 최적투입문제를 Benders 분해법을 적용하여 수정모드와 예방모드를 동시에 고려한 (n-1) 상정사고의 안전도 제약 유연송전기기 최적투입방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 계획단계에서 건전 상태 및 선택된 (n-1) 상정사고 계통상태들에 대해 수정모드 문제를 통하여 최적운전점과 투입계획에 대한 감도를 계산하고 이를 바탕으로 예방모드에서 전체적인 투입계획을 수립한다. 제시한 알고리즘을 IEEE 30모선과 수정된 New England 39모선 시험계통에 적용한 사례를 통해 그 유용성을 검증하였다.

2. 문제의 구성

2.1 목적함수

유연송전기기 투입계획에서는 계통계획자가 투입하고자 하는 유연송전기기의 형태에 따라 목적함수는 조금씩 다를 것이다. 본 논문에서의 목적함수는 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 유연송전기기에 따

2.2 제약조건

최적의 유연송전기기 투입량을 계산하기 위한 제약조건은 교류조류계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효전력 상·하한 제약, 전압 상·하한 제약, 변압기 탭 상·하한 제약, 그리고 유연송전기기의 운전상·하한 제약으로 구성된다. 각각의 제약들을 아래의 식에 나타내었다. 제약조건도 역시 nc개의 계통상태를 고려하기 때문에 n번째의 계통상태에 대한 제약조건 식(2.a~g)과 같은 set이 nc개가 존재하게 된다.

$$P_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}) = P_{n,i0} \quad (2.a)$$

$$Q_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}) = Q_{n,i0} \quad (2.b)$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gn,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t) \leq Q_{Gi,max} \quad (2.c)$$

$$V_{Li,min} \leq V_{Ln,i} \leq V_{Li,max} \quad (2.d)$$

$$V_{Gi,min} \leq V_{Gn,i} \leq V_{Gi,max} \quad (2.e)$$

$$t_{i,min} \leq t_{n,i} \leq t_{i,max} \quad (2.f)$$

$$x_{FSi,min} \leq x_{FSn,i} \leq x_{FSi,max} + \Delta x_{FSi}^T \cdot r_i \quad (2.g)$$

3. Benders 분해법의 적용

투자문제에서 운용 문제와 투자 문제를 동시에 고려한다는 것은 정수 변수를 포함하는 혼합정수비선형계획법(Mixed Integer Non-Linear Programing)이 된다. 일반화된 Benders 분해법 이론은 단계적인 연속변수의 최적화 결정을 포함하는 증장기적인 투자문제에 대한 결정을 위한 전체적인 문제 해결 방법을 제시해 준다.

3.1 수정모드 부문제

수정모드 부문제는 예방모드 부문제에서 제시된 유연송전기기의 투입위치 및 투입량에 대해 각 계통상태에 대한 최적 운전점을 찾고 투입계획에 대한 감도를 계산한다. 따라서, 고려하는 계통상태들의 수만큼의 부문제가 존재한다. m번째 Benders 반복계산에서 n 번째 계통상태에 대한 부문제는 다음과 같다.

$$\min f_1^m = f_{0n}^m + \sum_j S_{FS,j}^m \cdot r_j^m \quad (3)$$

subject to

$$P_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}^m) = P_{n,i0} \quad (4.a)$$

$$Q_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}^m) = Q_{n,i0} \quad (4.b)$$

$$Q_{Gi, \min} \leq Q_{Gn,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t) \leq Q_{Gi, \max} \quad (4.c)$$

$$V_{Li, \min} \leq V_{Ln,i} \leq V_{Li, \max} \quad (4.d)$$

$$V_{Gi, \min} \leq V_{Gn,i} \leq V_{Gi, \max} \quad (4.e)$$

$$t_{i, \min} \leq t_{n,i} \leq t_{i, \max} \quad (4.f)$$

$$x_{FSi, \min} \leq x_{FSn,i} \leq x_{FSi, \max} + \Delta x_{FSi}^T \cdot r_i^* \quad \lambda_n \quad (4.g)$$

λ_n 은 유연송전기기 상한제약에 대응하는 쌍대변수이다. 위 부분제는 비선형문제이다. 본 논문에서는 이 문제를 풀기 위해 연속선형계획법(SLP)을 이용하였다.

3.2 예방모드 주문제

nc개의 각 부문제로부터 얻은 정보를 바탕으로 구성되어 유연송전기기의 투입용량 및 위치를 결정한다. 쌍대변수 λ 는 각 부문제의 최적해에서 x_{FS} 의 부등호제약이 단위량 변화하였을 때 부문제의 목적함수의 변화율을 나타내며, 주문제에 중요한 정보를 제공한다. Benders 반복 m 번째 부문제 계산 후, m 번째까지의 쌍대변수 및 각 부문제의 목적함수들을 가지고 구성되는 m+1 번째의 유연송전기기의 투입결정의 주문제는 다음과 같이 구성된다.

$$\min f_2 = \sum_{n=1}^m f_0^{n+1} + \sum_i \Delta S_{FSi}^{m+1} \cdot r_i^{m+1} \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad f_0_1^{m+1} \geq f_0_1^j + \sum_i \lambda_{1,i}^j (\Delta S_{FSi}^{m+1} - \Delta S_{FSi}^j) \quad (6)$$

$$\vdots$$

$$f_0_n^{m+1} \geq f_0_n^j + \sum_i \lambda_{n,i}^j (\Delta S_{FSi}^{m+1} - \Delta S_{FSi}^j)$$

$$\vdots$$

$$f_0_{nc}^{m+1} \geq f_0_{nc}^j + \sum_i \lambda_{nc,i}^j (\Delta S_{FSi}^{m+1} - \Delta S_{FSi}^j)$$

- r_i : 0 또는 1
- $n=1, \dots, nc$: 각 계통상태를 나타내는 인덱스
- $j=0, 1, \dots, m$: Benders iteration

4. 유연송전기기 모델 및 적용

4.1 STATCOM 모델 및 적용

유연송전기기 중 병렬보상기기인 STATCOM은 모선의 전압과 직각인 위상차를 갖는 교류전류를 모선에 주입하여 모선에 주입되는 무효전력량을 제어함으로써 모선 전압을 제어하는 기기이다. STATCOM은 정상상태 해석 측면에서의 무효전력원으로 표현될 수 있다. STATCOM이 i번째 모선에 투입되었을 때의 무효전력 주류 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{Ti}(\delta, V_L, V_G, t) + Q_{Li} - Q_{STAT,i}(V_i) - Q_G = 0 \quad (7)$$

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

STATCOM의 주입전류 $I_{STAT,i}$ 가 $I_{STAT,i0}$ 로 고정된 값을 갖을 때, 위 식을 V_i 에 대하여 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\partial Q_{Ti} / \partial V_i - I_{STAT,i0} = 0 \quad (8)$$

따라서 STATCOM이 투입되었을 때, 전력주류 자코비안은 위 식과 같이 변형되어야 한다. STATCOM의 투입목적은 투입모선에 무효전력을 제어하여 모선의 전압을 안전한 범위내로 조정하는 것이다. 따라서 유연송전기기 투입에 따른 목적함수 f_{FS} 는 다음과 같이 전압편차 최소화로 정하였다.

$$f_{FS} = \beta \sum_i (V_{n,i} - V_{i,spec})^2 \quad (9)$$

4.2 SSSC 모델 및 적용

유연송전기기 중 직렬보상기기인 SSSC는 선로에 선로전류와 직각의 위상차를 갖는 교류전압을 주입하여 선로 양단 모선간의 전압차이를 조절함으로써 선로에 흐르는 전류를 제어하는 기기이다. SSSC 전력주류계산 모델은 기존의 전압원인버터 투입모델에 선로전류와 주입전압의 위상차가 직각이 되어야 한다는 조건을 고려하여 도출한다.

$$P_{SSSCi} = r_{SSSC} V_i^2 Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \quad (10.a)$$

$$P_{SSSCi} = -r_{SSSC} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \quad (10.b)$$

$$Q_{SSSCi} = -r_{SSSC} V_i^2 Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \quad (10.c)$$

$$Q_{SSSCi} = r_{SSSC} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \quad (10.d)$$

선로(i-j)에 SSSC가 투입된다면 SSSC에 의한 의존부하가 i 모선과 j모선에 투입되므로 기존의 자코비안의 i, j모선에 해당하는 성분을 다음과 같이 간단히 수정할 수 있다. 표.1에서 위첨자 0이 붙은 성분은 SSSC 투입전의 자코비안 성분을 나타낸다.

표.1 자코비안 행렬의 수정

$H_{i,i} = H_{i,i}^0$	$N_{i,i} = N_{i,i}^0 + 2P_{SSSCi}$
$H_{i,j} = H_{i,j}^0$	$N_{i,j} = N_{i,j}^0$
$H_{j,i} = H_{j,i}^0 + Q_{SSSCi}$	$N_{j,i} = N_{j,i}^0 + P_{SSSCi}$
$H_{j,j} = H_{j,j}^0 - Q_{SSSCi}$	$N_{j,j} = N_{j,j}^0 + P_{SSSCi}$
$J_{i,i} = J_{i,i}^0$	$L_{i,i} = L_{i,i}^0 + 2Q_{SSSCi}$
$J_{i,j} = J_{i,j}^0$	$L_{i,j} = L_{i,j}^0$
$J_{j,i} = J_{j,i}^0 - P_{SSSCi}$	$L_{j,i} = L_{j,i}^0 + Q_{SSSCi}$
$J_{j,j} = J_{j,j}^0 + P_{SSSCi}$	$L_{j,j} = L_{j,j}^0 + Q_{SSSCi}$

직렬 보상기기인 SSSC를 연계선로에 투입하는 목적은 연계선로의 조류량을 제어하여 연계선로의 (n-1) 상정사고 발생시 계통의 미치는 영향을 최소화하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 SSSC 투입에 따른 목적함수로 다음과 같은 식(11)을 이용한다.

$$f_{FS} = \beta \sum_i (V_{n,i} - V_{i,spec})^2 - \gamma P_{SSC,ij} \quad (11)$$

5. 사례연구

5.1 STATCOM 최적투입계획

IEEE 30모선 계통을 이용하여 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용한 방법과 개별 상정사고를 따로 고려한 수정모드 계획을 비교해 보았다. 부하수준은 원래의 값에서 20%증가시켜 중부하 수준이 되게 하였고 전압 상하한은 1(p.u.)을 기준으로 부하모선은 5% 그리고 발전기 모선은 0.5%로 하였다.

투입 후보지는 부하증가에 대한 전압강도가 가장 민감한 10개 취약모선을 선정하였다. 표.2는 투입 후보지 모선과 각각의 전압강도를 보이고 있다. 초기 투입량은 0(MVAR)이다. 상정사고의 선택은 취약모선과 연결되어 계통손실이 큰 13개의 선로를 선택하였다.

표.2 취약모선들과 각 모선에서의 전압강도

모선	V(p.u)	전압강도	모선	V(p.u)	전압강도
19	0.9137	-0.047616	30	0.9041	-0.035239
20	0.9193	-0.044975	25	0.9263	-0.035004
24	0.9164	-0.041246	22	0.9310	-0.033226
29	0.9194	-0.036456	21	0.9297	-0.032810
26	0.8969	-0.03529	17	0.9420	-0.032799

표.3은 각각의 상정사고를 개별적으로 고려한 수정모드를 통하여 구한 수정모드만의 STATCOM 투입계획이다. 투입 후보지로 선정한 10개 모선 모두에 총 164(MVAR)가 투입되었다.

표.3 수정모드만을 고려한 투입계획

투입모선	투입용량	투입모선	투입용량
17	14(MVAR)	24	20(MVAR)
19	6(MVAR)	25	14(MVAR)
20	20(MVAR)	26	20(MVAR)
21	10(MVAR)	29	20(MVAR)
22	20(MVAR)	30	20(MVAR)

표.4는 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용한 STATCOM의 최적투입위치 및 용량을 나타내고 있다. 총 7개 모선에 92(MVAR)의 설비가 투입되었다.

표.4 STATCOM 최적투입위치 및 용량

투입모선	투입용량	투입모선	투입용량
21	20[MVAR]	26	18[MVAR]
22	20[MVAR]	29	20[MVAR]
25	8[MVAR]	30	6[MVAR]

표.3과 표.4를 비교하여 보면 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용한 경우, 투입모선의 수가 4곳이 적고 전체 투입용량은 72(MVAR) 더 적게 투입되었음을 알 수 있다.

그림.1은 STATCOM 최적투입계획에 따른 투입전과 투입후의 건전 상태 및 각 상정사고 상태에서의 계통 전체 손실을 비교한 것이다. STATCOM 투입 이후에 전체적으로 손실이 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

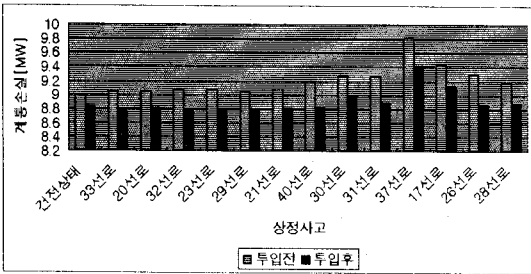


그림.1 계통손실의 비교

그림.2는 STATCOM 최적투입계획에 따른 투입전과 투입후의 건전 상태 및 각 상정사고 상태에서의 전압편차의 합을 비교한 것이다. STATCOM 투입 이후에 전체적인 전압편차가 많이 줄어들었으며 건전 상태 및 각 상정 상태에서 전압편차가 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

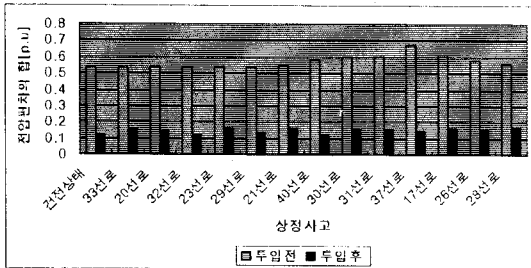


그림.2 전압편차의 비교

5.2 SSSC 최적투입계획

사례연구를 위해 New England 39모선 계통을 5개의 발전기 모선과 7개의 부하 모선을 갖는 지역 A와 5개의 발전기 모선과 10개의 부하모선을 갖는 지역B로 나누었으며 이 때 26-27 선로, 13-25 선로, 14-24, 그리고 16-21 선로가 지역 A와 B를 연결하는 연계선로들이다. 초기 계통에서 지역 A에서 지역 B로 연계선로를 통해 흐르는 유효전력조류를 표.5에 나타내었다.

표.5 연계선로에 흐르는 유효전력조류의 양

연계선로 (A → B)	유효전력조류 (A → B)
25→13	45.0[MW]
24→14	221.9[MW]
21→16	448.6[MW]
26→27	240.6[MW]
총합	956.1[MW]

SSSC를 연계선로에 투입하는 목적은 연계선로의 조류량을 제어하여 연계선로의 (n-1) 상정사고 발생시 계통에 미치는 영향을 최소화하는 것이다.

표.5에서 보여주는 것과 같이 네 개의 연계선로 중에서 13-25 연계선로의 유효전력조류량이 가장 작다. 따라서 선로의 열용량 한계를 고려하여 볼 때 13-25 연계선로가 투입후 보지가 된다.

표.6은 SSSC의 최적투입위치 및 용량을 나타내고 있다.

13-25 연계선로에 9.5(MVA)의 설비가 투입되었다.

표.6 SSSC 최적투입위치 및 용량

투입위치	투입용량
13-25선로	9.5(MVA)

표.7과 표.8은 SSSC 투입전·후 각 계통상태에 따른 연계선로의 총 조류량, 계통손실, 그리고 전압편차를 보여준다. 손실과 전압편차는 거의 변하지 않았지만 연계선로의 조류량이 증가했음을 알 수 있다. 또한 상정사고 발생시 선로 열용량 한계에 대한 위험을 경감시킬 수 있음을 알 수 있다.

표.7 SSSC 투입전 연계선로조류량, 계통손실 및 전압

조류량	상정사고	건전	16-21	26-27	14-24
P(25,13) [MW]		45	130.3	205.8	99.1
P(24,14) [MW]		221.9	509.3	265.9	
P(21,16) [MW]		448.6		481.3	576.4
P(26,27) [MW]		240.6	307.9		280.4
연계선로조류 총량[MW]		956.1	947.5	953	955.9
계통손실[MW]		65.6	74.9	66.8	67.8
전압편차의 합[p.u.]		0.007	0.006	0.006	0.007

표.8 SSSC 투입후 연계선로조류량, 계통손실 및 전압편차

조류량	상정사고	건전	16-21	26-27	14-24
P(25,13) [MW]		53.85	138.5	210.11	107.13
P(24,14) [MW]		219.9	507.5	264.3	
P(21,16) [MW]		447.6		480.9	574.8
P(26,27) [MW]		235.6	303.6		275.5
연계선로조류 총량[MW]		956.95	949.6	955.31	957.43
계통손실[MW]		65.7	74.9	66.8	67.9
전압편차의 합[p.u.]		0.007	0.007	0.007	0.007

6. 결 론

본 논문에서는 교류조류계산에 기반하여 (n-1) 상정사고의 안전도 제약을 고려한 유연송전기기의 최적투입계획 수립방안을 제시하였다. Benders 분해법을 적용하여 각 계통상태마다 수정모드 문제를 통하여 최적운전점과 투입계획에 대한 감도를 계산하여 이를 바탕으로 예방모드 문제에서 전체적인 투입계획을 수립하였다. 수정모드와 예방모드를 동시에 고려함으로써 수정모드만을 고려하였을 경우보다는 경제적 조화성을 향상시킬 수 있었다. 또한 수립된 계획에 따라 계통손실 감소와 전압분포개선이 이루어지거나 목적하는 유효전력을 제어할 수 있음을 확인하였다.

병렬 유연송전기기가 STATCOM과 직렬 유연송전기기가 SSSC를 계획문제의 정식화에 포함하기 위하여 각각의 정적인 모델을 도출하였다. 이 모델을 본 논문에서 제시한 알고리즘에 적용하여 투입목적에 따른 유연송전기기의 투입이 계통의 효율성을 증가시켜 정상상태뿐 아니라 각 상정사고상태에서의 계통의 유연한 운용을 가능하게 함을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Brian Stott, Ongun Alsac, Alcir J. Monticelli, "Security Analysis and Optimization", Proceedings of The IEEE, Vol. 75, No. 12, December 1987.
- [2] Sergio Granville, Maria Candida Abib Lima, "Application of Decomposition Techniques to VAR Planning: Methodological & Computational Aspects", IEEE Trans. on Power System, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [3] A. M. Geoffrion, "Generalized Benders Decomposition", Journal of Optimization Theory and Application, Vol. 10, No. 4, 1972
- [4] IEEE Working Group, CIGRE Working Group, "FACTS OVERVIEW", IEEE 95TP108.
- [5] L. Gyugyi, C. Schauder, and K. K. Sen, "Static synchronous series compensator : a solid-state approach to the series compensation of transmission lines", IEEE PES Winter meeting, pp. 150-159, 1996.
- [6] Preecha Preedavichit, S. C. Srivastava, "Optimal Reactive Power Dispatch Considering FACTS Devices", Elsevier Science Ltd, Electric Power Systems Research 46, 1998.
- [7] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press, 2000.