

조속기 모델을 포함한 최적조류계산

김태균, 이병준, 송화창*
고려대학교, 군산대학교*

Optimal Governor Power Flow

Taegyun Kim, Byongjoon Lee, Hawchang Song*
Korea University, Kunsan National University*

Abstract - 본 논문은 일반적인 최적조류계산에 조속기 모델을 포함한 조속기 최적조류계산 알고리즘을 제시한다. 최적조류계산 문제를 풀 때 무효전력 최적화 문제의 해를 제시하는데 있어 유효전력의 분배는 조속기 모델에 따라 자동적으로 배분되므로 무효전력원 및 발전단 단자 전압의 조절을 통하여 무효전력 최적화를 수행할 수 있다. 이는 mid-term 상태에서의 최적해를 제시하고자 할 때 보다 실효성을 가진다. 또한 계통상태의 변화에 따른 주파수 변화에 대한 정보를 추가로 얻을 수 있어 다양한 응용분야에 활용성이 높다.

1. 서 론

최적조류계산은 목적함수에 따라 유효전력 최적화 문제와 무효전력 최적화 문제로 나누어 최적해를 탐색한다. 무효전력 최적화 문제에 있어 계통의 운전점이 변화되거나 또는 상정사고의 발생에 따라 생기는 계통 손실의 차이는 유효전력 수급 불균형을 가져오고 이는 최적화 탐색에 있어 해를 수립시키지 못하게 한다. 일반적으로 수급균형을 위하여 슬랙모션의 유효전력 출력제약을 이용하여 최적화를 수행하지만 조속기 모델을 포함하면 보다 정확한 최적해를 제시할 수 있다. 즉, 계통의 유효전력의 변화량에 해당하는 양을 주파수 제어에 의해 각 발전기별로 출력량을 조절하게 되고 이는 기본적으로 조속기 조류계산에 기반하여 최적화를 수행하는 것으로 준동적 상태에서 유용하게 적용될 수 있다.

최적조류계산에서 조속기 모델을 추가하게 되면 최적조류계산 정식화에 허용 가능한 주파수 제약이 포함되어야 하며 유효전력의 수급균형은 주파수 제어에 따라 자동 분배된다. 최적화를 위하여 사용되는 알고리즘은 비선형 주·쌍대 내점법을 사용한다. 또한 보다 현실적인 시뮬레이션을 위하여 발전기 무효전력 출력제약은 유효전력과 단자전압에 따라 유동적으로 변화하도록 적용한다. 본 알고리즘의 검증용 위하여 뉴잉글랜드 39모션 계통으로 테스트를 수행하였다.

2. 조속기 최적조류계산의 정식화 및 해법

조속기 최적조류계산의 기본 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max} \\ x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

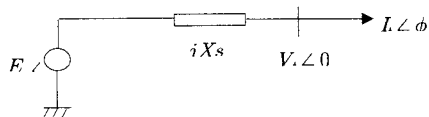
여기서, x : 상태 변수의 집합으로 발전량(P_g), 모션전압(V, δ), 변압기 tap ratio (t, ϕ) 등
 $f(x)$: 전력계통의 목적함수 (스칼라 함수)
 $g(x)$: 전력조류 방정식

$h(x)$: 전력계통의 부등식 제약(line flow 제약 및 무효전력 출력 제약)

h^{\max}, h^{\min} : 부등식 제약의 상하한

x^{\max}, x^{\min} : 변수 x 의 상하한

부등식 제약 $h(x)$ 는 비선형 방정식으로 표현되는 선로 조류방정식과 무효전력 특성곡선이 포함되며 무효전력 특성곡선의 모델링은 다음과 같다.



<그림1> 동기기 등가회로

$$P + jQ = \overline{V_t} \overline{I_t}^* \quad (2)$$

여기서, 허용 전류의 최대값을 고려하면 다음과 같다.
 $|P + jQ| \leq I_{t\max} V_t$ (3)

또한, 그림1로부터 다음과 같은 수식을 유도한다.

$$\overline{I_t} = \frac{E_f - \overline{V_t}}{jX_s} = \frac{I_{fd} X_{ad} \angle \delta - V_t}{jX_s} \quad (4)$$

수식(2)와 수식(4)를 통하여 다음과 같이 표현한다.

$$\left| P + j \left(Q + \frac{V_t^2}{X_s} \right) \right| \leq \frac{X_{ad}}{X_s} I_{fd\max} V_t \quad (5)$$

수식(2)와 수식(5)에서 보여지는 각 전류의 최대값으로 인하여 무효전력의 출력제약이 결정되며 유효전력과 무효전력의 정격출력과 정격 단자전압을 통하여 각 전류의 최대값이 계산된다. 계산된 최대값을 통하여 다음과 같이 무효전력 한계 특성을 나타낸다.

$$Q_f = \sqrt{\frac{X_{ad}^2}{X_s^2} I_{fd\max}^2 V_t^2 - P^2} - \frac{V_t^2}{X_s} \quad (6)$$

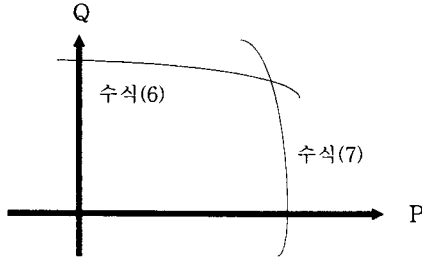
$$Q_a = \sqrt{I_{t\max}^2 V_t^2 - P^2} \quad (7)$$

수식(6)과 수식(7)에서 계산된 값을 통하여 무효전력 출력제약의 상한값과 하한값을 정의한다.

$$Q_{\max} = \text{Min}(Q_f, Q_a) \quad (8)$$

$$Q_{\min} = \text{Max}(Q_f, -Q_a) \quad (9)$$

이렇게 구해진 무효전력 특성곡선은 다음과 같이 표현된다.



<그림2> 무효전력 특성곡선

무효전력 출력제약 $h(x)$ 는 위에서 보인 수식(6)과 수식(7)에 의하여 유효전력 출력값과 단자전압에 따라 유효적으로 변화할 수 있도록 제약을 설정한다.

다음으로 전력조류방정식에 조속기 모델을 포함하는 과정을 보인다. 수식(1)의 등호제약 $g(x)$ 는 유효전력 수급방정식과 무효전력 수급방정식으로 구분되며 유효전력 수급방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) - P_{Gi} + P_{Li} = 0 \quad (10)$$

위의 수식(10)은 조속기모델이 포함되지 않은 일반적인 유효전력수급방정식이다. 여기에 조속기모델을 포함하여 새로운 유효전력수급방정식을 정의한다.

조속기동작에 따른 유효전력 출력 변화량은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta P_{Gi} = \frac{1}{R_i} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (11)$$

여기서, R_i : 조속기의 droop (p.u.)

ΔP_{Gi} : 유효전력 출력 변화량

f_0 : 계통의 정격 주파수 (60Hz)

Δf : 계통의 주파수 변화량

수식(11)로부터 조속기 모델을 포함한 유효전력 출력량은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{mi} - (w_{sys} - w_0)(D_i + \frac{1}{R_i}) \quad (12)$$

여기서, P_{mi} : 발전기의 기계적 입력 (p.u.)

w_{sys} : 현재 계통의 주파수 (p.u.)

w_0 : 계통의 정격 주파수 (1 p.u.)

D_i : 발전기의 damping (p.u.)

R_i : 조속기의 droop (p.u.)

수식(12)로 모델링된 유효전력 출력량을 수식(10)에 대입하여 새로운 유효전력수급방정식을 세운다.

이렇게 구성된 조속기 최적조류계산 문제는 라그랑지 함수를 구성하고 KKT 방정식을 만들어 Newton 법을 통하여 해를 탐색한다. 비선형 내점법의 알고리즘은 다음과 같다.

Step1 : 초기치 설정 : 주·쌍대변수와 라그랑지 승수가 실행가능영역에서 시작되도록 초기치를 결정한다. 또한, 중심 파라미터 $\sigma \in (0, 1)$ 를 결정한다.

Step2 : 상보값 계산 : 다음 식(13)과 같이 모든 부등식 제약으로부터 유도된 상보 값을 계산한다.

$$C_{gap} = \sum_{i=1}^r (l_i z_i - u_i w_i) \quad (13)$$

Step3 : 수렴판정 : 수렴판정은 조류방정식의 최대오차와 상보값이 수렴 한계치 내로 들어오면 종료하고 그렇지 않으면 다음 단계로 진행한다.

Step4 : 배리어 파라미터(μ)의 계산 : 부등식제약을 효

과적으로 다루기 위해 도입되는 배리어 파라미터 μ 를 다음과 같은 방법으로 계산한다.

$$\mu = \sigma \frac{C_{gap}}{2r} \quad (14)$$

Step5 : 수정방정식의 해를 계산 : 축약된 수정방정식을 계산해서 주변수와 등식제약의 라그랑지 승수의 수정량을 구하고 이것을 통하여 쌍대변수와 부등식제약에 관한 라그랑지 승수의 수정량을 구한다.

Step6 : 최대스텝 길이의 계산 : 단계5에서 구한 각 변수의 수정량이 적용될 최대스텝 길이를 구하기 위한 다음과 같은 방법으로 ratio test를 수행한다.

$$step_P = 0.9995 \min \left[\min \left(\frac{-l}{\Delta l} : \Delta l < 0, \frac{-u}{\Delta u} : \Delta u < 0 \right), 1 \right] \quad (15)$$

$$step_D = 0.9995 \min \left[\min \left(\frac{-z}{\Delta z} : \Delta z < 0, \frac{-w}{\Delta w} : \Delta w > 0 \right), 1 \right] \quad (16)$$

Step7 : 변수의 수정 : 주·쌍대변수의 수정량을 다음과 같이 계산한다.

$$(x, l, u)_{k+1}^T = (x, l, u)_k^T + step_P (\Delta x, \Delta l, \Delta u)^T \quad (17)$$

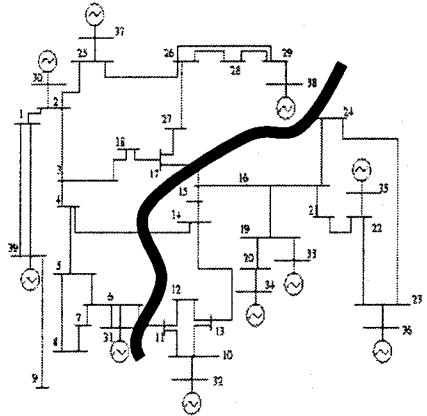
$$(\lambda, z, w)_{k+1}^T = (\lambda, z, w)_k^T + step_D (\Delta \lambda, \Delta z, \Delta w)^T \quad (18)$$

수정 후 단계2로 돌아가서 수렴할 때까지 과정을 반복한다.

3. 사례연구

본 논문에서 제시하는 조속기 최적조류계산 알고리즘을 뉴잉글랜드39모선 계통에 적용한다.

다음은 뉴잉글랜드39모선 계통도이다.



<그림3> 뉴잉글랜드39모선 계통도

그림3에서 보이는바 같이 계통은 크게 두 지역으로 나누어 지며 선로 6-11, 4-14, 15-17에 의하여 연결되어 있다. 본 논문에서는 위의 3개 선로중 4-14 선로사이에 대한 계통변화시 목적함수로 유효전력손실최소화를 수행하여 조속기 최적조류계산 결과를 제시한다.

무효전력 최대값을 가지는 발전기가 있어야 무효전력 특성곡선을 적용하였을 때 효과를 비교할 수 있으므로 계통을 140% 증부하 상태로 조정한다. 모든 모선의 전압제약은 0.95에서 1.05까지로 하고, 무효전력 특성곡선을 적용하기 위해서는 발전기의 유효전력 정격 추력값을 알아야 하므로 모든 발전기의 상한을 2000MW로 정하고 먼저 최적조류계산을 수행하여 결과값을 정격 출력으로 정한다.

다음은 증부하 상태에서의 최적조류계산 결과이며 이

를 계통의 초기값으로 한다.

모선번호	단자전압	P_g	Q_g	Q_g^{\min}	Q_g^{\max}
30	1.0500	738.04	222.68	-100.00	380.00
31	1.0176	1034.63	500.00	-220.00	500.00
32	1.0372	705.68	500.00	-300.00	500.00
33	1.0200	671.21	275.85	-300.00	500.00
34	1.0382	726.17	302.64	-230.00	450.00
35	1.0500	1139.52	459.54	-250.00	600.00
36	1.0500	423.38	146.93	-220.00	500.00
37	1.0500	602.01	167.86	-220.00	500.00
38	1.0500	833.88	239.95	-300.00	500.00
39	1.0337	1796.80	225.25	-800.00	900.00

계통주파수 : 60.0000 Hz, 계통손실 : 60.63 MW
 <표1> 중부하상태의 최적조류계산 결과

계통의 4-14 선로사고의 경우 무효전력 특성곡선을 적용하지 않은 조속기 최적조류계산 결과는 다음과 같다.

모선번호	단자전압	P_g	Q_g
30	1.0500	738.28	242.61
31	1.0069	1034.87	500.00
32	1.0350	705.92	500.00
33	1.0202	671.45	277.23
34	1.0384	726.41	303.31
35	1.0500	1139.76	460.61
36	1.0500	423.62	147.52
37	1.0500	602.25	175.40
38	1.0500	834.12	243.23
39	1.0358	1797.04	256.43

계통주파수 : 59.9928 Hz, 계통손실 : 63.01 MW
 <표2> 4-14 선로사고시 조속기 최적조류계산 결과(무효전력 특성곡선 반영 안됨)

무효전력 특성곡선에 사용될 각 발전기별 X_S 값은 다음과 같다.

모선번호	30	31	32	33	34
X_S	1.6587	2.0490	1.7400	1.8100	1.6587
모선번호	35	36	37	38	39
X_S	1.7980	1.7700	1.7700	1.5730	적용안함

<표3> 발전기별 X_S data

계통의 4-14 선로사고의 경우 무효전력 특성곡선을 적용한 조속기 최적조류계산 결과는 다음과 같다.

모선번호	단자전압	P_g	Q_g
30	1.0500	738.12	224.17
31	1.0500	1034.71	595.83
32	1.0500	705.76	491.77
33	1.0177	671.29	258.26
34	1.0359	726.25	294.91
35	1.0500	1139.60	447.01
36	1.0500	423.46	140.01
37	1.0500	602.09	164.10
38	1.0500	833.96	235.79
39	1.0338	1796.88	209.93

계통주파수 : 59.9976 Hz, 계통손실 : 61.42 MW
 <표4> 4-14 선로사고시 조속기 최적조류계산 결과(무효전력 특성곡선 반영)

4. 결 론

본 논문에서 제안된 방법을 통하여 준동적 상태에서 조속기 모델을 이용한 최적조류계산 해법을 제시할 수

있음을 보였다. 표1에서 최적화된 상태를 초기값으로 하였을 때 표2에서 사고 발생시 계통손실이 증가하지만 손실을 최소화하기 위한 무효전력 운용방안을 제시하고 있으며 유효전력은 조속기 특성에 따라 출력을 조절하고 있음을 보였다. 또한 보다 현실성을 반영하기 위하여 도입된 무효전력 특성곡선을 적용할 경우 표4에서와 같이 발전기 단자전압 및 유효전력 출력을 조절하여 보다 효율적인 운용방안을 제시함을 확인할 수 있었다.

조속기 최적조류계산은 최적조류계산에서 제공하는 다양한 정보와 더불어 허용주파수 범위 내에서 최적해를 찾을 수 있는가에 대한 정보와 특정사고 발생시 주파수 변화에 대한 정보를 추가로 제공한다. 본 논문의 알고리즘은 계통해석 및 제어방안 수립 등에 다양한 해석이 가능하도록 하여 계통계획 수립 및 운용에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.3, August 1998
- [2] D. Idizior, P.Rusche, S.Tedeschi, L.shu, A.Yazdankhah, "Inertial, Governor, and AGC/Economic Dispatch Load Flow Simulations of Loss of Generation Contingencies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.PAS-104, No.11, November 1985
- [3] "Voltage Stability / Security Assessment and On-Line Control", EPRI TR-101931 Volume 1, Project 3040-01 Final Report, April, 1993
- [4] C.W. Taylor, K.Y.Lee, and D.P.Dave, "Automatic Generation Control with Governor Deadband Effects", IEEE Trans. on Power App.and Syst., Vol. PAS-98, Nov./Dec. 1979
- [5] C.Concordia, L.K. Kirchmayer, and E. A. Szymanski, "Effect of Speed-Governor Deadband on Tie-Line Power and Frequency Control Performance", AIEE Trans. on Power App. and Syst., Vol.75, August, 1957
- [6] PSS/E 30, "Pss/e Model Manual", Shaw Power Technologies, Inc, August, 2004