

부하역률 제약을 고려한 최적 급전 알고리즘

김광욱 · 조종만 · 김진오
한양대학교 전기공학과

The optimal power flow algorithm considering load power factor limits

Kwang-Wook Kim · Jong-Man Cho · Jin-O Kim
Dept. of EE, Hanyang University

Abstract - This paper presents the method for computing the power economic dispatch with an optimal power flow (OPF) computation algorithm, considering the power factor limits constraint. Efficient reactive power planning enhances economic operation as well as system security. Accordingly, an adequate level of power factor limits for the load buses should be evaluated for economic operation. The power factor limits are included and described into the OPF's objective function. The proposed method is applied to IEEE 26 buses system.

1. 서 론

현재 국내 전력산업은 세계적인 전력산업 구조개편에 맞추어 안정성을 최우선으로 삼았던 단일 독점 체제에서 효율성을 강조하는 분할 경쟁 체제로의 이행이 진행되고 있다. 따라서 그동안 계통의 안정성을 우선으로 하였던 계통계획이 각 전력시장 참여자의 경제적인 이득을 우선으로 함으로써 계통의 안정성을 위협하는 문제가 발생하고 있다. 예를 들어 계통의 유효전력 수급이 만족한 상태임에도 불구하고 무효전력의 수급불균형으로 인한 전압의 붕괴 및 계통설비에 지속적인 손상을 입히는 문제가 일어나고 있다.

따라서 전력계통의 무효전력 제어는 계통의 경제적이고 안정적인 운영을 위하여 계통운영자, 송전, 배전회사의 유기적인 상호 연계와 적절한 규정에 따라 이루어져야 한다. 이는 효과적인 무효전력제어를 통하여 적정수준의 부하역률(Load Power Factor)을 유지하였을 때 계통의 무효전력 손실 최소화 및 적정 계통전압을 유지할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 역률 기준 설정의 해외사례를 이용하여 계통 부하별 부하역률제약 기준을 설정하고 이를 기존의 발전비용 최소화를 목적으로 하는 최적조류계산(OPF)의 제약조건에 포함시켰을 때 계통의 파라미터와 비용의 변화에 대하여 IEEE 26 모선계통에 적용하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 OPF 문제의 정식화

발전연료비용 최소화를 목적으로 발전기의 유효·무효 전력 출력, 변압기 탭 비, 부하모선의 전압, 병렬 캐패시터 및 리액터 등의 무효전력 공급원의 상하한치를 제약 조건으로 하는 일반적인 OPF문제를 정식화하면 다음과 같다.

$$\min f_{cost} = \sum_{i \in N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (1)$$

$$s.t. 0 = P_i - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$0 = Q_i - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad i \in N_g$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i \in N_g$$

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max} \quad i \in N_T$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N_B$$

$$Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max} \quad i \in N_c$$

N_g : 발전기, N_T : 변압기, N_B : 부하모선, N_c : SC

2.2 역률 제약 조건을 포함한 OPF 문제의 정식화

위 (1)식의 제약조건에서 최적화 알고리즘에 의해 조정되는 제어변수는 각 발전기의 유효전력 출력과 변압기의 탭 비, 병렬 캐패시터 등과 같은 무효전력원이 된다. 이에 본 연구에서는 부하모선에서 일정 역률 이상을 유지시키기 위하여 다음과 같은 역률기준을 제약조건에 포함시킨 OPF를 제안하고자 한다.

$$PF_i^{\min} \leq PF_i \quad i \in N_B$$

위 식 (1)에서 부하모선의 전압 V_i , 발전기 무효전력 출력 Q_g , slack 발전기의 출력 P_{gs} 와 제안한 PF_i 는 상태변수이기 때문에 penalty 함수를 이용하여 목적함수에 포함시켜 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{i \in N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \\ & + \sum_{i \in N_b} \lambda_{Vi} (V_i - V_i^{\lim})^2 + \sum_{i \in N_g} \lambda_{Qg} (Q_{gi} - Q_{gi}^{\lim})^2 \\ & + \lambda_{Pgs} (P_{gs} - P_{gs}^{\lim})^2 + \sum_{i \in N_c} \lambda_{PF_i} (PF_i - PF_i^{\lim})^2 \quad (2) \end{aligned}$$

$$s.t. 0 = P_i - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$0 = Q_i - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad i \in N_g, i \neq s$$

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max} \quad i \in N_T$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N_B$$

$$Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max} \quad i \in N_c$$

$\lambda_{V_i}, \lambda_{Q_{gi}}, \lambda_{P_{gs}}, \lambda_{PF_i}$: Penalty factors

그리고 $V_i^{lim}, Q_{gi}^{lim}, P_{gs}^{lim}, PF_i^{lim}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_i^{lim} = \begin{cases} V_i^{min} & \text{if } V_i < V_i^{min} \\ V_i^{max} & \text{if } V_i > V_i^{max} \end{cases}$$

$$Q_{gi}^{lim} = \begin{cases} Q_{gi}^{min} & \text{if } Q_{gi} < Q_{gi}^{min} \\ Q_{gi}^{max} & \text{if } Q_{gi} > Q_{gi}^{max} \end{cases}$$

$$P_{gs}^{lim} = \begin{cases} P_{gs}^{min} & \text{if } P_{gs} < P_{gs}^{min} \\ P_{gs}^{max} & \text{if } P_{gs} > P_{gs}^{max} \end{cases}$$

$$PF_i^{lim} = \begin{cases} PF_i^{min} & \text{if } PF_i < PF_i^{min} \end{cases}$$

2.3 부하별 부하역률 기준 설정과 적용

계통의 무효전력 관리 즉, 부하역률 관리는 계통의 전압과 직결된 문제로서 무효전력 공급 부족 시 계통의 전압이 저하되어 계통 붕괴로 이어질 수 있으며, 공급 과잉 시에는 계통유지 전압 이상 과전압 발생과 계통설비에 지속적인 손상을 입힐 수 있다. 따라서 계통의 안정성 측면에서 전압과 부하역률은 함께 고려되어야 한다.

이미 전력산업의 민영화가 정착된 미국의 경우 계통의 전압운영과 부하역률관리는 각 ISO(독립계통운영자)와 발전, 송전, 배전회사 그리고 대규모 수용가까지 복합적으로 연관된 문제이기 때문에 이에 관련된 기준도 국내 규정보다 상세히 관리 및 유지되고 있다.

미국 NEPOOL에서는 년 1회씩 ISO에 의해 계절별 부하량에 따라 부하역률 변동폭을 조사하여 ISO가 정한 부하역률 기준과 비교분석한다.

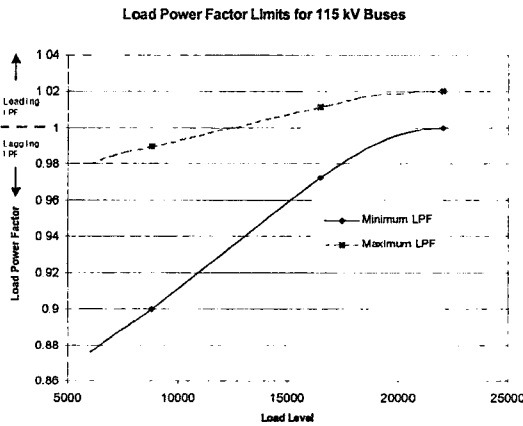


그림 1. NEPOOL의 최대, 최소 부하역률 제한

그림 1은 실제 NEPOOL에서 모의한 부하량에 따른 역률제한 기준을 보여주고 있다. 부하량에 따라 중부하, 정상시, 경부하로 나누어 과전압과 저전압 상황을 모의하여 계통에서 규정하고 있는 전압을 유지하기 위하여 최최고역률과 최저역률을 나타내었다. 따라서 NEPOOL에서는 ISO 및 발전, 송전 배전회사들이 위와 같은 역률규정에 의하여 상호 유기적으로 계통의 무효전력의 공급과 소비를 조절하고 있다.

이에 본 논문에서 제안한 역률제한의 기준을 정하고자 IEEE 26 모선계통의 부하량에 따른 역률 제한기준을 설정하고 이를 OPF에 포함될 부하역률 제약조건에 적용하여 분석하였다.

3. 사례 연구

3.1 부하별 역률제한 기준 설정

먼저 부하역률 제한 기준을 정하기 위하여 모의계통에서 역률이 나쁜 3모선(9, 11, 12)을 선택하여 부하량에 따른 부하역률 제한기준을 정하였다. 본 연구에서는 계통 부하량에 따른 저전압 조건 즉 최소 부하역률 기준만을 모의하였다. 아래 그림 2는 3모선 중 11모선의 계통 부하별 역률 그래프를 나타내었다.

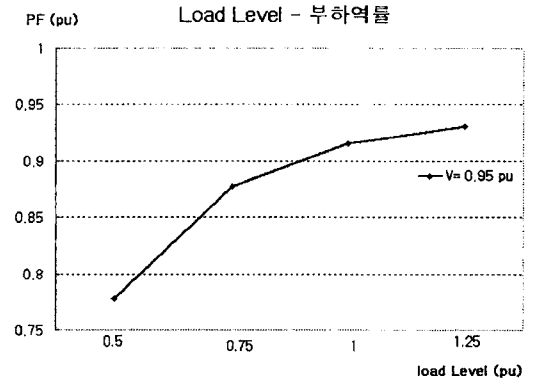


그림 2. 11모선의 부하별 역률 그래프

표 1. 11모선의 부하별 역률

부하 (pu)	PF
0.5	0.778
0.75	0.878
1	0.916
1.25	0.930

그림 2와 표 1에 11모선에서 계통 부하량에 따라 규정 전압 0.95 pu를 유지하기 위한 역률값을 나타내었다. 9, 12모선도 위와 동일한 방법으로 부하량에 따른 역률값을 구하였고 이를 본 논문에서 제안한 역률제한 기준으로 정하였다.

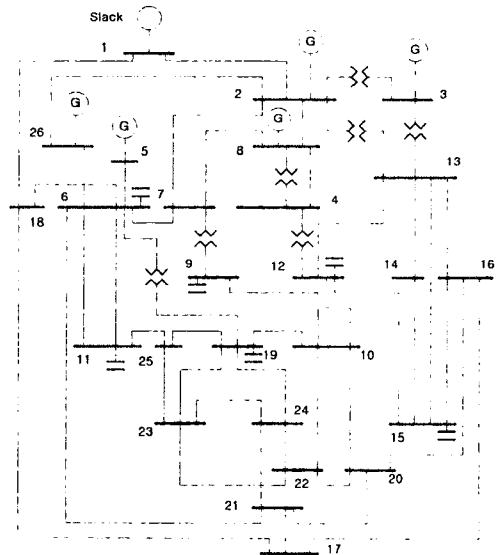


그림 3. One line diagram of IEEE 26

3.2 역률제약 조건을 고려한 OPF 계산

앞서 살펴본 부하량에 따른 역률제약 기준값을 기존 OPF 제약조건에 포함시켰을 때 계통의 파라미터와 비용 측면에서 어떻게 변하는지 살펴보았다.

표 2. IEEE 26 계통모선 발전기 data와 발전비용 파라미터

발전기 출력 제한과 발전비용 파라미터						
Bus	1	2	3	4	5	26
P_g^{\max}	500	200	300	150	200	120
P_g^{\min}	100	50	80	50	50	50
Q_g^{\max}		250	150	80	160	50
Q_g^{\min}		-40	-40	-40	-40	-15
a	240	200	220	200	220	190
b	7.0	10.0	8.5	11.0	10.5	12.0
c	0.007	0.0095	0.009	0.009	0.008	0.0075

표 3. 부하전압과 탭 비 제한

부하버스 limits		변압기 탭 limits	
V_i^{\max}	V_i^{\min}	T_k^{\max}	T_k^{\min}
1.05	0.95	1.05	0.95

표 2와 3에는 26모선계통의 발전기의 유효 및 무효전력 출력의 상하한치 및 연료비용계수, 부하 전압과 탭 비 상하한치를 나타내었다. 변압기 탭 비는 0.025 pu씩 조절 하였으며, 병렬 캐패시터는 6, 9, 11, 12, 15, 19모선에 설치되어있다. 본 사례연구에서는 부하역률이 나쁜 9, 11, 12 모선의 역률을 제어하기 위해 해당모선에 영향을 많이 주는 주변 변압기 (2-3), (6-19), (7-9)를 조절하게 하였고, 9, 11, 12 모선의 병렬 캐패시터를 제어하였다.

위와 같은 가정을 두었을 때 기존 OPF와 본 논문에서 제안한 부하역률 제약을 고려한 OPF와의 비교는 다음 표 4와 같다.

표 4. 발전기 출력량과 비용의 비교

조 건	P_g (MW)	Q_g (MVAR)	S_g (MVA)	비용 (\$/h)
Initial Power Flow	1278.73	626.99	1424.17	16764.01
Without PF OPF	1275.54	597.60	1408.59	15443.96
With PF OPF	1275.40	576.44	1399.62	15442.67

년간 발전 비용 비교	비 용 (\$/Y)
Without PF 와 with PF OPF	11300.4

표 4에서는 역률제약조건을 포함하지 않은 Without PF OPF와 역률제약조건을 포함한 With PF OPF와의 비용과 유효·무효전력출력 값의 차이를 나타내고 있다. 역률 제약 조건을 포함시켰을 때 비용 측면에서 연간 11300.4 \$를 절감할 수 있었고 발전기의 피상전력 출력 (S_g)에 있어서 연간 78511.7122 MVA를 절감 할 수 있었다. 비용측면에서의 절감효과는 두드러지진 않았지만 발전기출력 측면에서는 절감효과가 크게 나타났으며, 이는 곧 발전기의 안정적인 경제적 운영에 효과가 큼을 보여주었다.

역률제약조건을 고려한 OPF계산 후 역률제약을 위반했던 모선의 부하역률은 부하별 역률제약 기준을 만족하는 값을 가지게 되었음을 다음 표 5.1에서 확인할 수 있다.

표 5.1 OPF 계산후 SC모선의 역률 변화

SC 모선	Without PF OPF	With PF OPF
9	0.872	0.912
11	0.857	0.928
12	0.880	0.900

그리고 역률제약조건을 포함한 OPF계산에서 제어하였던 변압기 탭 비와 SC 투입량은 다음과 같다.

표 6.1 Tap Setting

From - To	Tap Ratio
2 - 3	0.975
2 - 13	0.975
3 - 13	1.025
4 - 8	1.05
4 - 12	1.05
6 - 19	1.0
7 - 9	0.975

표 6.2 SC 모선의 SC 투입량

SC 모선	SC 투입량 (MVAR)
6	5
9	10
11	5
12	5
15	5
19	5

4. 결 론

본 논문에서는 계통운영 계획을 위한 최적조류계산에서 기존에 발전비용 최소화를 목적으로 하는 제약조건에 부하별 역률제약조건을 포함시킨 OPF문제를 제안하였다. 사례연구를 통하여 적절한 역률제약 기준을 제시하였으며 이를 적용시켰을 때 적절한 변압기 탭 비와 SC의 투입으로 무효전력을 제어하여 발전비용의 이득과 동시에 발전기의 경제적이고 안정적인 운영에 효과적임을 보였다.

앞으로 국내 역률 규정에도 일률적인 역률규정의 적용보다는 계통 상태나 부하에 따른 세밀한 역률 규정의 수립과 연구가 이루어져야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Bjelogric, Calovic, Ristanovic, Babic "Application of Newton's optimal power flow in voltage/reactive power control" IEEE Transactions on , Volume: 5 Issue: 4 , Nov 1990
- [2] Bridenbaugh, C.J. DiMascio, D.A. D'Aquila, R. "Voltage control improvement through capacitor and transformer tap optimization" IEEE Transactions on , Volume: 7 Issue: 1 , Feb 1992
- [3] NEPOOL OPERATING PROCEDURE NO. 17 "Load Power Factor Correction" 1998. 8
- [4] Hadi Saadat "Power System Analysis" McGraw-Hill, 1999