

부하모델과 송전선로 혼잡을 고려한 최적조류계산의 모선가격 분석

김문영* 백영식* 송경빈**
*경북대학교 **계명대학교

The analysis of nodal prices in the optimal power flow including a load model and the congestion of transmission lines

Moon-Young Kim* Young-Sik Baek* Kyung-Bin Song**
*Kyungpook National University **Keimyung University

Abstract - In a deregulated power market, a load model considered the characteristics of electric consumers is required and the congestion management of transmission lines should be resolved in a point of economic benefits. It is essential that the optimal power flow algorithm is applied to manage transmission line congestion. Therefore, in this paper, we implement the optimal power flow with object function of social welfare maximization based linear programming and analysis the nodal prices for generations and loads through a numerical study.

여자들의 이익을 최대화 하는 사회복지 최대화를 목적함수로 하는 최적화 문제가 된다. 그러므로, 사회복지 최대화의 OPF 모델을 정식화하면 다음의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Max : \sum_{j=1}^{NG} B_j(P_{Dj}) - \sum_{i=1}^{NG} C_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

Subject to

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Di} - P_{Ti} &= 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{Ti} &= 0 \\ P_{Di} &= \alpha_i P_i + \beta_i \\ P_{Gi}^{\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\ LF_{ij} &\leq LF_{ij}^{\max} \\ P_{Di}^{\min} &\leq P_{Di} \leq P_{Di}^{\max} \end{aligned}$$

1. 서 론

비용 최소화를 목적함수로 하는 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow)의 모형은 경쟁 전력시장의 구조에서 전력시장에 참여하는 전력 소비자의 효과를 고려하지 않으므로 이를 만족하기 위한 용도로써 부하모델을 고려한 변형된 OPF 모형 개발이 필요하다.[1,2,3] 시장 참여자로서 생산자와 소비자는 모두 자신의 이익을 최대화 하는 방향으로 행동할 것이다. 따라서, 생산자의 잉여와 소비자의 잉여의 집합으로 나타나는 사회복지(social welfare) 최대화가 경쟁시장에 적합한 OPF의 목적함수가 된다.[1,2,4]

기존의 OPF 모델 정식화와 비교할 때, 총 발전비용의 최소화 목적함수에서 사회복지 최대화 목적함수로 변화될 뿐 아니라 부하모델이 등식 제약조건으로 포함되고, 부하의 상·하한 용량제약이 부등식 제약조건으로 포함될 형태가 된다.

전력산업의 규제완화로 인한 송전선 개방에 따라 송전선 혼잡문제에 따른 합리적인 혼잡처리(congestion management)가 요구된다.[5] OPF는 그 수행결과로 최적 발전력 배분과 가격정보에 대한 기술적 기반을 제공할 뿐만 아니라 전력 전송문제 해결과 송전선 혼잡비용의 계산 등에도 적용 가능하다. 사회복지 최대화를 목적함수로 하는 OPF 모델에서는 각 모선의 한계비용이 계산 가능하다. 따라서, 전력산업의 구조개편과 관련하여 송전선로 혼잡문제는 경제적 이득 관점에서 해결해야 될 과제이고 송전선로의 효율적인 혼잡처리를 위해 최적화 기법인 OPF의 적용이 필요하다.

2.1 소비자 부하모델의 정식화

부하는 부하차단과 같은 특정 경우를 제외하고는 기존의 비용 최소화 OPF 문제에서 조정 가능한 제어변수가 되지 않는 상수로 취급된다. 그러나, 전력산업의 구조개편 후에는 경쟁 전력시장의 구조에서 전력 소비자들도 전력시장에 참여하게 되므로 소비자들의 전력소비는 그들의 성향에 따라 변화될 수 있다. 전력 소비자인 부하는 특히 전력가격변화에 따라 대부분 민감하게 변화될 것이다. 따라서, 부하는 가격에 따라 변화되므로 OPF 문제에서 잠재적인 제어변수가 될 수 있다. 그러므로, 경쟁 전력시장에 적합한 OPF 문제에서 부하모델의 필요성은 중요하다. 소비자 부하는 그림 1과 같은 부하곡선에 의해 전력가격에 따라 변하는 가격의 함수가 된다.

그러므로, 본 논문에서는 전력 소비자들의 성향을 포함하는 부하모델을 고려하고 사회복지 최대화를 목적함수로 하는 경쟁 전력시장에 적합한 OPF 알고리즘을 선형 계획법(Linear Programming)을 이용하여 개발하며, 송전선로 용량제약에 따른 선로혼잡 처리를 해결하기 위해 선로조류 민감도 개념을 적용하여 사례 연구를 통해 OPF 수행 결과에 대한 각 모선의 가격을 분석한다.

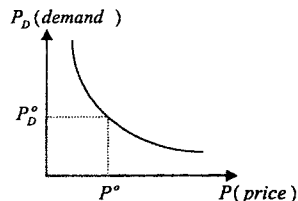


그림 1. 부하 곡선
Fig. 1. Demand curve

2. 사회복지 최대화의 OPF 모델 정식화

자원 배분의 효율성을 중시하는 후생 경제학의 관점에서 소비자의 잉여와 생산자의 잉여의 합으로 구성되는 사회복지를 최대화하는 것이 가장 바람직한 방법이라 할 수 있다. 따라서, 경쟁 전력시장에 적합한 OPF는 계통 운영의 물리적, 기술적 제약조건을 만족하면서 시장 참

일반적으로 부하함수는 다음의 식(2)와 같은 지수함수 형태로 표현할 수 있다.

$$P_{Di} = D_i (P_i)^{E_i} \quad (2)$$

여기서, D_i 는 개별 부하에 대한 수요 상수를 나타내며, E_i 는 수요 탄력계수를 의미한다. 식(2)는 Taylor Series를 이용하여 초기 가격 점(P^0)에서 부하함수를 일차함수의 식으로 표현될 수 있다. 식(3)은 일차함수로 표현된 부하함수를 나타낸 것이다.

$$P_{Di} = \alpha_i P_i + \beta_i \quad (3)$$

부하함수의 역함수는 전력소비의 한계이익을 나타내며, 이 함수의 적분형이 전력 소비자의 특성함수인 이익함수가 된다. 따라서, 소비자의 이익함수는 다음의 식(4)와 같이 수학적으로 표현된다.

$$B_i(P_{Di}) = \frac{1}{2\alpha_i} P_{Di}^2 - \frac{\beta_i}{\alpha_i} P_{Di} \quad (4)$$

여기서, α_i, β_i 는 수요 상수(D_i)와 수요 탄력계수(E_i)로부터 유도된 것이며 부하의 특성을 나타내는 계수값이다.

3. 선형계획법을 이용한 최적화문제의 정식화

본 논문에서는 목적함수의 제어 변수로 작용되는 유효 전력 성분만에 대한 최적화 문제를 다루며, 사회복지 최대화를 목적함수로 하는 OPF 문제를 목적함수와 제약조건들이 선형인 선형계획법을 이용하여 최적화 문제로 변형하였다. OPF 모델의 정식화는 최소화 문제로 변형하여 다음의 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min} : & \left(\sum_{i=1}^{NG} \frac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} \cdot \Delta P_{Gi} \right) \\ & - \left(\sum_{i=1}^{ND} \frac{\partial B_i(P_{Di})}{\partial P_{Di}} \cdot \Delta P_{Di} \right) \quad (5) \end{aligned}$$

Subject to

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_i} \right] [\Delta \delta_i] &= [\Delta P_{Gi}] \\ \sum_{i=1}^{NG} \Delta P_{Gi} &= 0 \\ \left[\frac{\partial P_{Di}}{\partial P_i} \right] [\Delta P_i] &= [\Delta P_{Di}] \\ \sum_{i=1}^{ND} \Delta P_{Di} &= 0 \\ [S^{(i,j)}]^T [\Delta P_{Gi}] &\leq [\Delta LF^{(i,j)}] \\ -[S^{(i,j)}]^T [\Delta P_{Di}] &\leq [\Delta LF^{(i,j)}] \\ \Delta P_{Gi}^{\min} \leq \Delta P_{Gi} &\leq \Delta P_{Gi}^{\max} \\ \Delta \delta_i^{\min} \leq \Delta \delta_i &\leq \Delta \delta_i^{\max} \\ \Delta P_{Di}^{\min} \leq \Delta P_{Di} &\leq \Delta P_{Di}^{\max} \\ \Delta P_i^{\min} \leq \Delta P_i &\leq \Delta P_i^{\max} \end{aligned}$$

부등식 제약조건에서 $[\Delta LF^{(i,j)}]$ 는 모선 i, j 사이의 송전 선로 최대 용량에서 현재 선로에 흐르고 있는 선로 조류량의 차이로써 모선 i, j 사이의 송전 선로 여

유 용량을 나타낸다. $[S^{(i,j)}]$ 는 선로조류 민감도 행렬로서 발전기 출력의 변화량에 대한 각 송전선 선로에 대한 영향 정도를 나타내는 행렬이다. [5] 송전선 혼잡을 고려하여 선로제약을 위반하지 않기 위한 방향으로 혼잡 선로에 가장 민감한 발전기부터 유효전력 발전량을 조절하게 되는데 이는 선로 조류 민감도 행렬로써 최적 유효 전력 변화량이 결정된다.

3.1 선형계획법을 이용한 OPF 알고리즘

사회복지를 최대화 하는 목적함수의 OPF 문제에서 최적의 해를 얻기 위해 IMSL 수치해석 라이브러리를 이용하여 선형계획법을 풀었다. 그림 2는 선형계획법을 이용하여 OPF 최적화 문제를 수행하기 위한 알고리즘을 나타낸 것이다.

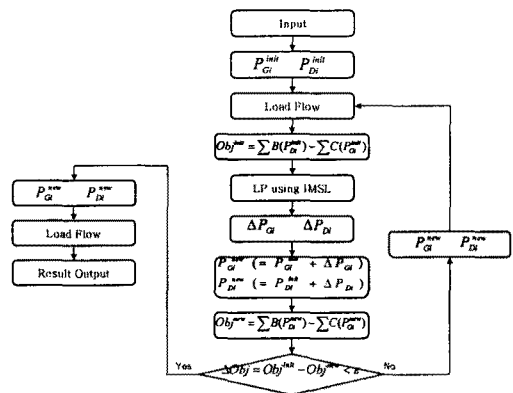


그림 2. 선형계획법을 이용한 OPF 알고리즘

Fig. 2. The algorithm of OPF using linear programming

4. 사례 연구

사례연구에서는 부하모델을 고려하여 경쟁 전력시장에 적합한 사회복지 최대화의 OPF 문제를 선형계획법을 이용하여 선로혼잡 유·무에 따른 모선가격을 분석하였다. 사례연구는 4모선 계통을 대상으로 실행하였으며, 예제 모선은 2개의 발전기 모선 및 2개의 부하 모선과 5개의 선로가 포함된 계통이다.

표 1. 사례연구에 사용된 모선 데이터

Table 1. Bus data for case study

Generation Data					
BN	a	b	c	$P_{G_i}^{\min}$	$P_{G_i}^{\max}$
1	561	7.0	0.00156	5	50
3	78	9.0	0.00482	5	30
Load Data					
BN	D	E	P^0	$P_{D_i}^{\min}$	$P_{D_i}^{\max}$
2	20.0	-0.2	7	5	20
4	35.0	-0.3	9	5	35

사례연구에 사용된 모선 데이터들을 표 1에 나타내었다. 발전기 모선의 발전력 상·하한 값과 부하 모선의 전력수요 상·하한 값들은 모두 [MW] 단위이다.

그림 3은 선로혼잡이 없을 때(no line congestion)와 선로혼잡이 발생될 때(line congestion)의 OPF 수행

결과를 발전기 모선의 발전력과 부하 모선의 전력수요 및 송전선 선로조류와 모선가격을 비교하여 나타낸 그림이다.

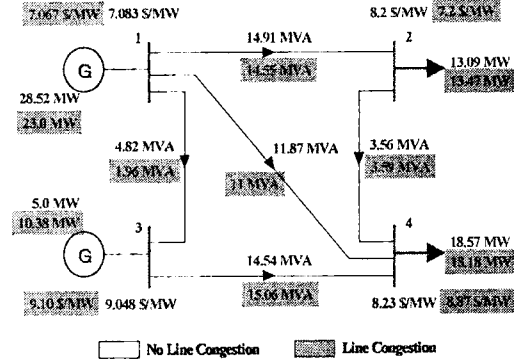


그림 3. 4 모선 사례연구 계통
Fig. 3. 4 bus case study system

모든 송전선의 선로용량을 100 [MVA]로 하여 선로혼잡이 발생되지 않을 때는 선로제약 내에서 목적함수에 맞는 최적의 발전력과 전력수요의 배분이 형성되는 것을 볼 수 있다. 여기에서, 선로혼잡을 발생시키기 위해 임의의 선로인 1번과 4번 모선사이 선로번호 3번 선로에 선로용량을 11 [MVA]로 선로제약을 두었다. OPF 수행 결과로 3번 선로의 선로조류는 최대 선로용량인 11 [MVA]로 흐르고 있으며 다른 선로에서도 선로 혼잡처리를 위한 방향으로 선로조류의 변화가 발생되었다. 1번 모선의 발전력은 선로혼잡이 없을 때 28.52 [MW]로 발전하였지만 선로번호 3번 선로의 혼잡처리를 위해 이 선로에 가장 민감한 발전기이므로 23.0 [MW]로 발전력이 감소되었으며, 3번 모선의 발전력에서는 선로혼잡이 없을 때 5.0 [MW]로 발전하였지만 3번 선로의 선로혼잡의 발생으로 4번 모선의 수요를 담당하기 위해 3번 모선의 발전기가 10.38 [MW]로 약 2배 이상으로 발전력이 증가되었음을 볼 수 있다. 선로혼잡 발생에 따른 모선가격의 변화는, 1번 발전기 모선은 발전량의 감소로 인해 모선가격은 7.083 [\$ /MW]에서 7.067 [\$ /MW]로 감소되었으며, 3번 발전기 모선은 발전량의 증가로 한계비용이 비싼 발전기의 증분발전으로 인해 모선가격이 9.048 [\$ /MW]에서 9.10 [\$ /MW]로 증가되었음을 알 수 있다. 4번 모선의 전력수요에서는 선로혼잡이 없을 때 모선가격이 8.23 [\$ /MW]로 18.57 [MW]의 전력소비를 하는 부하였지만, 3번 선로의 선로혼잡에 따라 혼잡비용이 모선 한계비용에 추가되어 4번 모선의 모선가격이 8.87 [\$ /MW]로 7.8% 증가하였으므로 부하는 모선가격 증가에 영향으로 18.18 [MW]로 2.1% 전력소비의 감소가 나타났다. 4번 부하 모선과 상대적으로, 2번 부하 모선에서는 선로혼잡이 없을 때 모선가격이 8.2 [\$ /MW]로 13.09 [MW]의 전력소비를 하는 부하였지만, 3번 선로의 선로혼잡에 따라 혼잡처리를 위해 선로조류를 유도하기 위한 방향으로 4번 부하 모선과는 상대적인 영향으로 인하여 모선가격이 7.2 [\$ /MW]로 12.2% 감소하였으므로 전력소비가 13.47 [MW]로 약 3% 증가한 것을 알 수 있다. 표 2는 선로혼잡이 없을 때와 선로혼잡이 발생할 때의 OPF 실행 결과 데이터를 비교하여 나타내었다. 목적함수의 값은 선로혼잡이 없을 때 104.81에서 선로혼잡이 발생할 때 혼잡처리에 따른 비용증가로 인하여 115.89로 10.6% 증가하였다. 유효전력의 손실량은 선로혼잡이 없을 때 1.86 [MW]에서 선로혼잡이 발생될 때

OPF 실행 후 1.72 [MW]로 7.5% 감소하였다.

표 2. 선로 혼잡처리에 대한 사례연구 결과
Table 2. Numerical results for line congestion management

LN	FB	TB	No Line Congestion		Line Congestion	
			LF ^{max}	LF	LF ^{max}	LF
1	1	2	100	14.91	100	14.55
2	1	3	100	4.82	100	1.96
3	1	4	100	11.87	11	11
4	2	4	100	3.56	100	3.59
5	3	4	100	14.54	100	15.06
Gen. Bus			P _G	$\frac{\partial C}{\partial P_G}$	P _G	$\frac{\partial C}{\partial P_G}$
1			28.52	7.083	23.0	7.067
3			5.0	9.048	10.38	9.10
Load Bus			P _D	$\frac{\partial B}{\partial P_D}$	P _D	$\frac{\partial B}{\partial P_D}$
2			13.09	8.2	13.47	7.2
4			18.57	8.23	18.18	8.87
Object			104.81		115.89	
Loss			1.86		1.72	

3. 결 론

본 논문에서는 일차함수로 표현되는 전력 소비자들의 성향을 포함한 부하모델의 정식화하고, 사회복지 최대화를 목적함수로 하는 최적화 모델을 적용하여 선형 계획법을 이용한 경쟁 전력시장에 적합한 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 최적조류계산 알고리즘과 선로조류 민감도 개념을 응용하여 예제 계통을 통해 선로혼잡 유·무에 따른 OPF 수행 결과를 각 모선에 대하여 분석하였다. OPF 수행 결과는 발전력과 부하 모두 OPF의 제어변수로서 목적함수에 적합한 최적의 상태와 더불어 송전선의 혼잡처리를 해결되었음을 확인하였다.

본 연구는 1999년도 기초전력공학공동연구소의 중기과제(과제번호 99-중-04)로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] J. D. Weber and T. J. Overbye, "Inclusion of price dependent load models in the optimal power flow", Proceedings of International Conference on System Sciences, Vol. 3, 62-70, 1998
- [2] J. Y. Choi, "Optimal real time pricing of real and reactive powers", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, 1226-1231, 1998
- [3] M. L. Baughman and S. N. Siddiqi, "Real-time pricing of reactive power: theory and case study results", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, 23-29, 1991
- [4] A. K. David, "Effect of inter-temporal factors on the real time pricing of electricity", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 1, 44-52, 1993
- [5] N. Y. Chin, "Congestion cluster based markets for transmission management", Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, 821-832, 1998