

분할 최적조류계산을 이용한 송전선 혼잡비용 감소 연구

정원호 · 이광호  
단국대학교 전기공학과

A Study of Reducing Congestion Cost using Decoupled Optimal Power Flow

Yun-ho Jeong · Kwang-ho Lee  
Department of Electrical engineering, Dankook University

**Abstract** - This paper presents an algorithm for reducing congestion cost using decoupled optimal power flow. The main idea of this algorithm is to reduce the reactive power flows on the congested lines in reactive power optimization. New objective function for reducing congestion cost is proposed in the reactive formulation by introducing the shadow prices for congested lines. The proposed algorithm is tested for IEEE 14-bus sample system, and the results are presented and discussed.

1. 서 론

최적조류계산(Optimal Power Flow: OPF)은 전력계통을 합리적이고 효율적으로 운용하기 위한 경제 운용에 최적화 기법이 도입된 것으로서 유효전력과 무효전력을 동시에 제어할 수 있어서 전력계통의 경제 운용에 중요한 수단이 되고 있다.

OPF 계산을 위한 선형계획법(Linear Programing)과 비선형계획법(Nonlinear Programing) 등 여러 가지 최적화 기법의 연구가 발표되고 있으며 세계적으로 전력계통 규제완화에 따른 송전선 개방이 추진되면서 그 관심이 더욱 높아지고 있다[1,2]. OPF 계산에는 계산시간 및 기억용량의 부담과 수렴성 문제 등의 어려운 문제가 있다. 이러한 점을 해결하기 위해 전력계통의 전압과 위상각 사이의 분할특성을 이용하여 유효전력 최적화와 무효전력 최적화 문제로 분할하여 해를 구하는 방법이 연구되어 왔다[2,3].

송전선이 개방된 전력계통에서 제한된 송전선로의 용량 때문에 경제적인 전력거래를 할 수 없는 현상을 혼잡(Congestion)현상이라 하며 이는 발전비용의 증가를 초래한다[4,5]. 송전선로 제약조건을 만족하는 최적발전력 배분은 OPF의 계산에 의해 이루어지며 일반적으로 유효전력조류만을 대상으로 한다. 그러나 혼잡을 야기하는 선로조류에는 유효/무효 전력이 모두 포함되며 본 연구에서는 혼잡선로에서의 유효전력제어와 함께 무효전력을 제어함으로써 혼잡비용의 발생을 감소시키고자 한다. 이를 위해 선로조류 제약조건에 무효전력이 포함된 피상전력을 사용하였고, 분할 OPF 계산과정에서 무효전력 최적화 문제에 혼잡선로에서의 무효전력조류와 잠재가격(Shadow Price) 정보가 결합된 새로운 목적함수를 정의하였다. 사례연구에서는 IEEE 14모선 계통에 대해 결합(Coupled) OPF, 기존의 분할(Decoupled) OPF 그리고 제안한 기법을 적용하여 발전비용과 계산시간 등을 비교·분석하였다.

2. 분할(Decoupled) 최적조류계산(OPF)

2.1 유효전력 OPF

유효전력 최적화는 다음과 같이 유효전력 수급조건, 송전선로 제약조건과 발전비용 최소화 문제로 정의된다.

$$\text{Min} \sum_{i \in NG} C_i(P_{Gi}) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in NG} P_{Gi} = \sum_{k \in ND} P_{Dk} + P_L \tag{2}$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i \in NG \tag{3}$$

$$|S_l| \leq S_l^{\max}, \quad l \in NL \tag{4}$$

여기서,  $C_i$ 은 모선  $i$ 의 연료비 함수,  $P_L$ 은 계통의 유효 전력손실,  $S_l$ 은 선로  $l$ 의 피상전력조류이고,  $NG$ 는 발전 모선 집합,  $ND$ 는 부하모선 집합,  $NL$ 은 선로 집합이다. 선로조류인 식(4)는 다음 식(5)와 같이 심한 비선형성을 가지므로 일반적으로는 유효전력조류만을 고려한다.

$$|S_l| = [P_l^2 + Q_l^2]^{1/2} \tag{5}$$

여기서,  $P_l$ 과  $Q_l$ 은 각각 선로  $l$ 에 흐르는 유효/무효전력 조류이다. 하지만 본 연구에서는 혼잡선로의 무효전력조류 제어가 핵심사항이므로 식(5)를 선형화하여 유효/무효전력이 모두 포함된 선로조류식을 사용한다. 선형화된 피상전력 조류식은 4절에서 소개된다.

2.2 무효전력 OPF

일반적인 무효전력 최적화에서 선로손실 최소화를 목적으로 하며 그 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Min} \sum_{l \in NL} P_{l, Loss} \tag{6}$$

$$\text{s.t.} V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad i \in NB \tag{7}$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad i \in NG \tag{8}$$

여기서,  $NB$ 는 계통의 전체 모선 집합,  $P_{l, Loss}$ 은 선로  $l$ 에서의 유효전력손실이다. 무효전력 최적화에서는 제어목적에 따라 선로손실 외에도 제어변수의 편차량, 무효전력 보상비용 등이 목적함수로 되기도 한다. 본 연구에서는 혼잡비용 감소를 위해 혼잡선로에서의 무효전력조류를 새로운 목적함수로 정의한 것이다. 제어변수는 발전 전압이 사용되며 식(7)과 (8)에서의 무효발전력과 부하모선전압은 발전전압에 대한 선형화 식이 사용된다. 이는 4절에서 간단히 소개한다.

3. 송전선 혼잡비용 감소

3.1 혼잡비용 감소를 위한 무효전력 OPF

일반적으로 선로조류는 유효전력만을 고려하나 실제의 선로용량은 피상전력으로 주어지므로 선로조류의 제약조건에는 유효/무효전력이 모두 작용한다. 따라서 유효전력은 물론 무효전력조류를 제어함으로써 혼잡비용을 감소시킬 수가 있다. 이 점이 본 연구에서의 기본착상이며 효과적인 혼잡비용 감소를 위해서 다음 식(9)의 목적함수를 무효전력 최적화에서 제안한다.

$$\text{Min} \sum_{l \in CL} \alpha_l Q_l \tag{9}$$

여기서,  $CL$ 은 혼잡선로,  $\alpha_l$ 은 다중의 선로에 혼잡이 발생하는 경우 각 혼잡선로에 대한 가중계수다. 이 때의

무효전력조류  $Q_i$ 은 다음 식(10)과 같은 일반적인 식을 사용하며 최적화 과정에서는 제어변수인 발전모션전압에 대한 식으로 변환되어 목적함수는 2차식이 된다. 발전모션전압으로의 변환은 4절에서 소개된다.

$$Q_i = V_i^2 B_{ij} + V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (10)$$

### 3.2 잠재가격 정보의 활용

잠재가격(Shadow Price)이라는 것은 선로제약 조건에 대한 라그랑지 승수로 나타나게 되는데, 최적조류계산 문제에 라그랑지 승수를 도입하여 확장된 목적함수로 나타내면 다음과 같다.

$$L(u, x) = f(u, x) + \lambda_e g(u, x) + \lambda_i h(u, x) \quad (11)$$

여기서,  $u$ 는 제어변수,  $x$ 는 상태변수,  $g(u, x)$ 는 수급조건 등의 등호 제약조건,  $h(u, x)$ 는 선로제약 등의 부등호 제약조건,  $\lambda_e$ 와  $\lambda_i$ 는 각각 등호 제약조건과 부등호 제약조건에 대한 라그랑지 승수이다. 최적화 문제를 계산하여 구해진 부등호 제약의 라그랑지 승수가 영이면 부등식조건을, 영이 아니면 등식조건을 만족한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 선로제약 조건에 대한 라그랑지 승수가 영이 아닌 값을 가지면 그 선로에 혼잡현상이 발생함을 알 수 있는 것이다. 또한 라그랑지 승수의 값이 클수록 비용함수의 변화 정도가 심하여 라그랑지 승수는 제약조건에 대한 잠재가격이라고 불리어진다.

본 논문에서는 혼잡의 정도를 나타내는 잠재가격 정보를 활용하여 무효전력 최적화의 목적함수에 혼잡선로별 가중계수를 적용함으로써 혼잡비용을 많이 발생시키는 선로에 많은 무효전력조류를 제어하여 혼잡비용 발생을 최소화한다.

## 4. OPF 기법

### 4.1 선로조류의 선형화

송전선로  $l$ 의 최대용량을 피상전력  $S_l^{\max}$ 라 할 때 선로조류 제약조건 식(4)는 식(5)를 대입하여 다음과 같이 표현된다.

$$P_l^2 \leq S_l^{\max 2} - Q_l^2 \quad (12)$$

여기서, 유효전력조류  $P_l$ 을 발전력  $P_G$ 에 대한 식으로 변형하기 위해 다음과 같은 근사식을 사용한다.

$$P_l = \frac{V_i V_j}{x_l} \cdot (\delta_i - \delta_j) \quad (13)$$

$$\delta = B^{-1} P_{inj} \quad (14)$$

식(13)에서의  $x_l$ 은 선로  $l$ 에서의 리액턴스,  $P_{inj}$ 는 각 모션에서의 주입(Injection) 유효전력 벡터이다. 식(13)은 DC 조류계산식으로서 모션위상각과  $P_{inj} = P_G - P_D$ 를 식(13)에 대입함으로써 발전력  $P_G$ 에 대한 선형함수로 유효전력조류를 표현할 수 있다. 한편 식(12)는 유효전력 최적화에서 제약조건으로 사용되므로 무효전력조류  $Q_l$ 을 상수로 볼 수 있다. 하지만 다음의 반복계산에서는  $Q_l$ 이 갱신되며, 이를  $k$  계산 단계에 대해 나타내면 다음 식(15)와 같다.

$$P_l^{(k)}(P_G)^2 \leq const^{(k)} \quad (15)$$

위의 식(15)를 테일러 전개하여 일차항만을 취하면 다음과 같이 발전력에 대한 선형식이 구해진다.

$$\sum_{i \in NG} a_i^{(k)} P_G + b_j^{(k)} \leq const^{(k)}, \quad j \in NL \quad (16)$$

여기서,  $a_i^{(k)}$ 와  $b_j^{(k)}$ 는 각각 식(16)을 테일러 전개했을 때의 1차항 계수와 상수항이다.

### 4.2 부하모션전압과 무효발전출력 감도

발전모션과 부하모션에서의 주입(Injection) 무효전력을 각각  $Q_G$ 와  $Q_L$ 이라고 할 때  $(k+1)$ 번째 반복과정에서 다음과 같은 선형식이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} Q_G^{(k+1)} \\ Q_L^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_G^{(k)} \\ Q_L^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{GG}^{(k)} & S_{GL}^{(k)} \\ S_{LG}^{(k)} & S_{LL}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G^{(k+1)} \\ \Delta V_L^{(k+1)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

위의 식에서  $Q_L$ 이 불변인 특성을 고려하면 다음 식(18)과 같이 부하모션 전압식이 구해진다.

$$\Delta V_L^{(k+1)} = - [S_{LL}^{(k)}]^{-1} S_{LG}^{(k)} \Delta V_G^{(k+1)} \quad (18)$$

또한 식(18)을 식(7)과 (8)의 부등식에 대입하면 다음과 같은 발전모션 전압에 대한 부등식이 유도된다[3].

$$V_L^{\min(k)} \leq T^{(k)} V_G^{(k+1)} \leq V_L^{\max(k)} \quad (19)$$

$$Q_G^{\min(k)} \leq U^{(k)} V_G^{(k+1)} \leq Q_G^{\max(k)} \quad (20)$$

따라서 계산과정에서는 발전전압 제약조건과 식(7), (19), (20)이 사용된다.

### 4.3 계산과정

본 논문에서 제안한 분할 OPF의 전체 흐름도는 그림1과 같다. 최적발전력을 결정하기에 앞서 혼잡발생 선로에서의 무효전력조류를 최소화하며, 이때 사용되는 잠재가격 정보를 구하기 위해 먼저 유효전력 OPF를 계산한다.

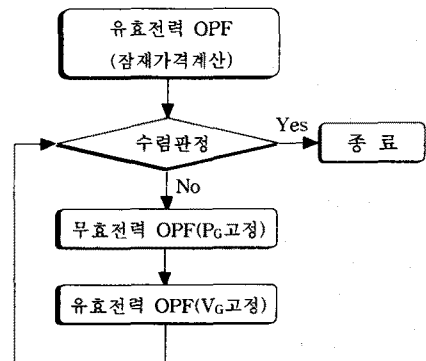


그림 1. 분할 최적조류계산의 전체 흐름도

그림1의 유효전력 OPF에서는 발전전압 ( $V_G$ )을 고정시켜 발전력 ( $P_G$ )과 잠재가격을 계산하며 내부의 반복계산 과정에서 식(16)의 선로조류 선형화 부등식이 사용된다. 무효전력 OPF에서는 발전력 ( $P_G$ )을 고정시키고 발전전압 ( $V_G$ )을 계산하며 내부의 반복계산 과정에서 발전전압으로 표현된 식(7), (19), (20)의 부등식이 사용된다.

## 5. 사례연구

IEEE 14모션 계통에 대하여 사례연구를 수행하였으며, 결합된(Coupled) OPF, 기존의 분할(Decoupled) OPF 그리고 제안한 기법을 적용하여 발전비용과 계산시간 등을 비교·분석하였다. 각 발전기의 운전제약과 연료비함수는 각각 표1과 같다.

표 1. 발전기 데이터(p.u.)

Table 1. Generator data(p.u.)

모선 번호	P <sub>G</sub> <sup>min</sup>	P <sub>G</sub> <sup>max</sup>	Q <sub>G</sub> <sup>min</sup>	Q <sub>G</sub> <sup>max</sup>	V <sub>G</sub> <sup>min</sup>	V <sub>G</sub> <sup>max</sup>	연료비 계수	
							1차항	2차항
1	0.10	1.00	-0.50	0.50	0.95	1.05	2.00	0.00315
2	0.20	0.50	-0.40	0.50	0.95	1.05	1.75	0.01750
3	0.15	0.80	0.00	0.40	0.95	1.05	1.00	0.06250
6	0.10	0.45	-0.06	0.24	0.95	1.05	3.25	0.00834
8	0.10	0.45	-0.06	0.24	0.95	1.05	3.00	0.02500

모든 부하모선 전압의 상·하한은 각각 0.95와 1.05이며 기준용량은 100[MVA]이다. 제안한 기법을 적용한 첫 번째 유효전력 OPF 계산결과, 각 선로에서의 피상전력 조류와 잠재가격은 다음 표2와 같다.

표 2. 첫 번째 유효전력 OPF의 선로조류와 잠재가격

선로 번호	연결 모선	선로조류 [MVA]	한계용량 [MVA]	잠재 가격	선로 번호	연결 모선	선로조류 [MVA]	한계용량 [MVA]	잠재 가격
1	1-2	60.2099	60	0.0140	11	4-9	7.7543	20	0
2	2-3	24.6241	40	0	12	7-9	41.5175	50	0
3	2-4	24.4117	25	0.9587	13	9-10	3.6936	20	0
4	1-5	27.6793	60	0	14	6-11	12.6013	25	0
5	2-5	17.8741	40	0	15	6-12	8.9534	20	0
6	3-4	17.2987	30	0	16	6-13	22.0209	30	0
7	4-5	28.9388	40	0	17	9-14	8.2068	30	0
8	5-6	5.3310	50	0	18	10-11	8.2735	20	0
9	4-7	11.7100	40	0	19	12-13	2.5855	20	0
10	7-8	47.2409	60	0	20	13-14	8.8889	20	0

표2에서와 같이 선로1, 3의 잠재가격은 각각 0.0140과 0.9587이고 나머지 선로에서 0 이므로 선로1, 3에 혼잡이 발생했음을 알 수 있다. 선로3의 잠재가격이 더 크다는 것은 선로 3의 혼잡이 선로1보다 혼잡비용을 더 많이 발생시킴을 나타낸다. 표2에서 선로 1과 3의 선로조류가 한계용량과 차이가 나는 것은 식(16)의 선로조류 선형화 오차, 식(13)의 선로저항을 무시한 근사식 사용, 유효전력 OPF에서 무효전력 고정 등이 원인으로 작용한 것이다. 둘째 단계의 무효전력 OPF에서 목적함수는 발전전압에 대한 선로1, 3의 무효전력조류 2차식과 잠재가격에 대한 가중합이 된다. 혼잡선로1, 3의 잠재가격은 정규화된 값 0.0144과 0.9856을 사용한다. 다음 표3은 무효전력 OPF 수행 후의 혼잡선로의 선로조류 결과를 나타낸다.

표 3. 무효전력 OPF의 혼잡선로 조류결과

선로번호	연결모선	선로조류 [MVA]	한계용량 [MVA]
1	1-2	63.0459	60
3	2-4	21.9999	25

표3에서 혼잡이 발생한 선로1, 3의 선로조류를 표2와 비교하면, 선로3의 조류는 감소한 반면 선로1의 조류는 증가되었음을 알 수가 있다. 잠재가격 정보로부터 선로1에서의 조류증가보다 선로3에서의 조류감소가 발전비용에 미치는 영향이 크기 때문에 전체적으로는 혼잡비용이 감소하게 된다.

셋째 단계에서의 유효전력 OPF를 수행하면 발전비용이 853.11가 되어 첫 번째 유효전력 OPF에서의 발전비용 916.61에 비하여 6.98%감소한다. 이때의 모선전압이 모두 허용범위 이내에 들어 계산은 종료된다.

다음 표4의 계산시간은 결합 OPF를 기준으로 환산한

값이며 결합 OPF의 실제 계산시간은 펜티엄 550[MHz]에서 8.648[sec]이다. 기존의 분할 OPF와 제안된 기법의 계산시간은 기준에 비해 각각 40%와 54%정도로서 기존의 분할 OPF보다 제안한 기법에서 시간이 더 걸리는 이유는 제안된 기법이 유효-무효-유효 OPF의 계산과정을 거친 반면 기존의 분할 OPF는 유효-무효 OPF에서 계산이 종료되기 때문이다. 하지만 제안된 기법은 발전비용 면에서 기존의 분할 OPF보다 크게 개선되었음을 알 수 있다.

표 4. 발전비용과 계산시간 비교

구분	기법	결합 OPF	기존의분할 OPF	제안된 기법	
				가중계수 적용	가중계수 없음
목적 함수	유효	발전비용	발전비용	발전비용	발전비용
			선로손실	무효전력조류	무효전력조류
발전비용	852.62	916.61 ( $\Delta=+63.99$ )	853.11 ( $\Delta=+0.49$ )	859.70 ( $\Delta=+7.08$ )	

제안된 기법을 결합(Coupled) OPF와 비교하면 발전비용은 조금 크나 계산시간은 많이 감소했음을 알 수가 있다. 발전비용이 결합 OPF보다 좀더 큰 것은 원래 하나의 문제를 분할하여 풀이함으로써 발생하는 오차이다. 또한 제안된 기법에서 무효전력 OPF의 목적함수에 가중계수를 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 우수한 최적성을 보이며 이는 혼잡의 정도를 알려주는 잠재가격 정보를 활용한 결과로 해석된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 혼잡선로에서의 무효전력 조류를 제어함으로써 혼잡비용을 감소시키는 최적화 기법을 제시하였다. 송전선 혼잡이 발생하는 경우 혼잡비용을 초래하는 유효전력 재배분을 수행하기 앞서 무효전력 조류를 감소시킴으로써 유효전력 재배분을 감소시킨 것이다. 또한 다중선로의 혼잡발생시 혼잡비용 증가의 정도를 나타내는 잠재가격을 계산하여 무효전력 최적화에서의 목적함수에 반영함으로써 혼잡비용 최소화를 개선하였다.

사례연구에서는 결합(Coupled) OPF, 기존의 분할(Decoupled) OPF 그리고 제안한 기법을 IEEE 14모선 계통에 적용하여 발전비용과 계산시간 등을 비교·분석하였다. 계산시간 면에서는 기존의 분할 OPF와 비슷하면서 발전비용 면에서는 결합 OPF에 근사함을 확인함으로써 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

## [참고 문헌]

- [1] J.A. Momoh, R.J. Koessler, "Challenges to Optimal power Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.1, pp.444-455, February 1997.
- [2] Z.Yan, N.D. Xiang, "A Hybrid Decoupled Approach to Optimal Power Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, No.2, pp.947-954, May 1996.
- [3] G.C. Contaxis, C. Delkis, "Decoupled Optimal Load flow Using Linear or Quadratic Programming", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-1, No.2, pp.1-7, May 1986.
- [4] Sally Hunt, Graham Shuttleworth, *Competition and Choice in Electricity*, John Wiley & Sons, 1996.
- [5] A. Papalexopoulos, H. Singh, G. Angelidis, "Congestion Management by an Independent System Operator", Pacific Gas and Electric company, San Francisco, California, pp.1-19, 1998.