

송전선에 흐르는 전력조류의 발전기별 상대 기여도를 이용한 DC-OPF 알고리즘

방영선, 고동욱, 전영환
홍익대학교 전력연구소

DC-OPF Algorithm using Relative-Contribution Index in Generators

Young-Sun Bang, Dong-Wook Ko, Yeong-Han Chun
Hongik University. School of Electrical Engineering

Abstract - The economic dispatch problem is important in both power system planning and operation, although there have been major advances in defining and solving more complete Optimal Power Flow(OPF) problems, there exists a need for constrained economic dispatch techniques which, though not as rigorous or as exact an OPF, are fast enough to be used on desktop computers. This paper presents a DC-OPF algorithm that is based upon Relative-Contribution Index in Generators. The transmission constraints are modeled as linear constraint based on a DC-Power-Flow model. An detailed illustrative example is presented.

1.1 연구배경 및 필요성

최근 전력산업은 구조개편과 더불어 새로운 발전기술의 유입, 규제완화에 대한 요구, 그리고 소비자 의식수준의 향상 등으로 인해 최적조류계산을 이용한 계통운전효율개선 및 자유경쟁에 의한 경영 효율개선의 시대로 접어들었다. 이와 같은 경쟁체제 하에서의 전력계통 계획과 운용은 계통의 신뢰도 및 안전운용기준, 망정속 및 송전망 이용가격 산정 등 객관적 기준에 의한 공정한 전력시장 운영이 요구된다. 기존의 OPF는 전력 계통의 여러 제약조건을 만족시키면서 특정 목적함수의 최적값을 구하는 비선형 최적화문제를 총칭하는 용어로서, 이는 경제성 측면에서 효율적인 전력계통 운용에 필수적 요소라 할 수 있다. 하지만 일반적인 조류계산(AC-Power Flow)을 이용한 Optimal Power Flow(OPF)는 비선형 문제를 풀어야 함에 있어 모든 변수를 벡터($\bar{E}_i = E_i \angle \delta_i$)($\bar{E}_i = E_i \angle \delta_i$)로 취급하고 있으므로 정확한 계산 값을 알 수는 있으나 비선형 방정식을 풀어야 함으로 복잡하고, 계통이 커지면 시간도 오래 걸리는 단점이 있다. 본 연구에서는 실제 조류 계산 값이 아주 정확하지는 않아도 대략적인 값을 알기에는 충분한 DC-POWER FLOW를 이용한 전력조류 방정식과 이식에서 유도되는 송전 선로에 흐르는 전력조류의 발전기별 상대 기여도 지수를 이용한 DC-OPF 알고리즘을 제안하였다.

1.2 연구동향 및 구성

1960년대 초, 전력 계통의 경제급전 (Economic Dispatch, ED) 문제의 연장선상에서 OPF 문제가 대두된 이래, 최적조류 계산문제는 전력 계통 분야에서 각광 받고 있다. 1962년 Carpentier에 의해 OPF 문제가 처음으로 제안된 후, 이러한 OPF 문제는 최적화 기법과 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 전력 산업의 구조 개편이 활발히 진행되고 있는 우리나라의 경우, 전력 계통의 운영과 계획 및 전력 경제 분야 연구에 기초적이고 필수적이라고 할 수 있는 OPF 문제에 대한 관심은 더욱 커지고 있는 것이 사실이다. 일반적인 OPF의 개념은 기술적, 물리적, 환경적 제약조건하에서 경제급전계획을 의미하며 개념적으로는 경제급전계획과 전력조류계산을 동시에 수행하는 것으로서, 이를 통해 단기 한계비용을 계산할 수 있으며, 이 단기 한계비용의 계산을 통해 각 모선에서의 잠재비용을 계산해 낼 수 있기 때문에 송전선 사용권과 관련된 중요한 사안인 혼잡비용 계산을 할 수 있는 유일한 수단이 된다. 이런 OPF를 풀기위해 복잡하고 비선형인 AC-OPF를 풀기보다는 비선형 식이 선형으로 표현되고, 계산과정 또한 간단해지는 DC-OPF가 개발되어 왔는데 이는 정확한 계산 값이 아닌 대략적인 값만 알아도 되는 경우가 많기 때문이다. 이 논문에서는 사례연구를 통해 제안된 알고리즘으로 된 DC-OPF의 값을 기존의 AC-OPF의 값과 비교해 보고, 제안된 알고리즘으로 된 DC-OPF의 신뢰도 및 발전기별 상대 기여도 지수에 의한 송전계약 알고리즘의 타당성을 보여주려 한다.

2. 본 론

2.1 DC-OPF

OPF 문제는 제약 조건이 있는 비선형 최적화 문제로 정의 될 수 있다. 기존의 경제급전문제와 유효전력 발전비용 최소화라는 목적함수 하에서 전력 수급 균형조건 제약등을 고려한 것과는 달리 OPF는 다양한 종류의 목적 함수와 제약 조건 등을 고려할 수 있는 일반적인 최적화 문제로 정식화 될 수 있는데, 이러한 제약조건들은 등식 제약조건과 부등식 제약조건으로 표현 할 수 있다. 목적함수로 가장 널리 채택되고 있는 것은 유효 전력 생산비용 최소화이다. 등식제약조건은 전력조류방정식을 들 수 있

며, 부등식 제약조건으로는 선로용량제약, 발전기 출력제약, 전압제약, 위상각제약, 상정사고 제약 등의 운전 조건들이 있다. 그 밖에도 환경오염방지 등 수많은 변수와 제약조건이 있을 수 있다. 이러한 OPF의 최적화 문제를 수식으로 간단히 표현하면 다음과 같다.[1]

$$\begin{aligned} \text{Min } f(P_g) & \quad (1) \\ \text{s.t. } P_g - P_L - P(V, \theta) &= 0 & (2) \\ Q_g - Q_L - Q(V, \theta) &= 0 & (3) \\ S(V, \theta) - S^M &\leq 0 & (4) \\ V^m \leq V \leq V^M & & (5) \\ P_g^m \leq P_g \leq P_g^M & & (6) \\ Q_g^m \leq Q_g \leq Q_g^M & & (7) \end{aligned}$$

여기서 $f(P_g)$ 은 비용함수, P_g 는 발전기의 발전량, 식 (2),(3)은 각각 유효, 무효전력 조류방정식을 나타내며, 식 (4)는 송전선로 용량 제약식을, 식(5)는 전압 제약식을, 식(6),(7)은 각각 발전기들의 유효, 무효전력의 출력 제약식을 나타낸다. 하지만 DC-OPF에서는 전압은 일정하게 놓고 무효전력은 고려 대상이 아니므로 식 (2),(5),(7)은 무시한다.

2.1.1 ED with Generator constraints

경제급전이란 전력시스템에서 송전선로의 손실 및 부하의 수요량을 최소의 비용으로 발전기가 운전 할 수 있게 하는 가장 좋은 발전 스케줄을 계획하는 것이다. 수송된 등식방정식은 최소화 문제의 최적조건으로 정의된다.

$$\text{Minimize } C = \sum_{j=1}^m C_j(P_j) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^m P_j = P_L + P_d \quad (9)$$

여기서 (8)은 총 발전기의 비용함수이고 (9)는 제약식으로 전력수급 방정식을 나타낸다. 하지만 DC-OPF를 구현하기 때문에 전력손실은 무시될 수 있다. 그래서 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$\frac{dC_i}{dP_i} \square IC_i = \lambda \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^m P_j = P_d \quad (11)$$

$$P_j^{min} \leq P_j \leq P_j^{max} \quad (12)$$

(10)은 각 발전기의 증분비용을 의미하고 (11)은 전력수급 방정식에서 손실을 0으로 둔 것이다. (12)는 발전기 제약의 의미한다.

어느 발전기의 비계약 급전에서 발전기 출력의 범위가 그 발전기 범위(식(12))에 있지 않다면 다음과 같은 정의를 사용한다.[3]

$$S_U \square \{i | P_i > P_i^{Max}\} \quad \text{Index set of upper limit}$$

$$S_L \square \{i | P_i < P_i^{Min}\} \quad \text{Index set of lower limit}$$

$$S_F \square \{i | P_i^{Min} < P_i < P_i^{Max}\} \quad \text{Index set for feasible generation}$$

송전손실이 없는 계통에서 증분비용이 증가해 가면서 식(12)에 의해 제약이 걸리면 다음의 식과 지수를 이용한다.

$$\Delta h \square \sum_{i \in S_U} h_i^{Max} - \sum_{i \in S_L} h_i^{Min} \geq (\leq) 0 \rightarrow S_{opt} \supseteq S_U (S_L) \quad (13)$$

$$h_i^{Max} \square P_i - P_i^{Max} > 0 \quad i \in S_U \quad (14)$$

$$h_i^{Min} \square P_i^{Min} - P_i > 0 \quad i \in S_L \quad (15)$$

여기서 식(14),(15)를 이용하여 Δh 를 계산하고 Δh 에 의해서 S_U or S_L 에 포함된 발전기들이 고정되어 가고 이외의 발전기들을 가지도 다시 ED를 반복하는 알고리즘이다.

2.1.2 DC-POWER FLOW

일반적인 POWER FLOW는 모든 변수를 벡터로 취급하고 있으므로 ($E_k = E_k \angle \delta_k$) 계산을 통해 정확한 값을 알 수는 있으나 비선형 방정식을 풀어야 한다. 하지만 계통 확충 계획의 입안 등 몇몇의 경우 개략적인 조류 결과만을 가지고도 판단 할 수 있다. DC POWER FLOW는 이러한 목적으로 고안된 간이 조류 계산법이다. DC POWER FLOW란 정식화된 비선형 전력 방정식을 선형 모델로 근사화해서 푸는 것이다. 이 이론은 송전선로에 흐르는 전력 조류에서 유효전력조류는 전압 위상각 분포에 의해서 결정되고, 무효 전력 조류는 전압 크기의 분포에 의해서 결정된다는 특성에 이론의 근거를 두고 있다. 일반적인 유효전력 P를 유도해 보면 다음과 같다.

$$P = \frac{X}{R^2 + X^2} E_k E_m \sin(\delta_k - \delta_m) + \frac{R}{R^2 + X^2} (E_k^2 - E_k E_m \cos(\delta_k - \delta_m)) \quad (16)$$

DC-POWER FLOW는 일반적으로 초고압 계통에서 R/X 값이 작고, 정상시의 계통 운용에서는 모선 전압이 거의 정격 전압 [1.0pu]으로 유지되고 또한 선로 양단의 모선 전압의 상차각도 작기 때문에 식(16)의 가정을 둘 수 있다.[4]

$$R \approx 0$$

$$E_k = E_m \approx 1.0 \quad (17)$$

$$\sin(\delta_k - \delta_m) \approx \delta_k - \delta_m = \delta_{km}$$

식(16),(17)을 이용하여 식(18)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ij} = \frac{\delta_i - \delta_j}{x_{ij}} \quad (18)$$

이것을 행렬식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} \delta_1' \\ \delta_2' \\ \vdots \\ \delta_{n-1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1,n-1} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n-1,1} & Z_{n-1,2} & \dots & k_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

식(18)과 (20)을 이용해서 송전선에 흐르는 조류식을 구할 수 있다.

$$T_{r,s} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_{is} - Z_{ir}}{x_{is}} \right) P_i = aP_1 + bP_2 + cP_3 + \dots + nP_n \quad (20)$$

여기서 a, b, c, ... n은 i모선에 j모선으로 흐르는 전력의 각 발전기별 기여도를 의미한다.

2.1.3 발전기별 상대기여도도 이용한 송전제약 알고리즘

제약이 걸린 송전선에 흐르는 전력조류의 발전기별 기여도를 구하고, 그 중 기여도가 가장 큰 발전기를 초기 기준발전기로 정한다. 이렇게 정한 초기 기준발전기와 나머지 발전기들의 기여도 차이를 이용하여 송전제약을 초과한 송전선의 전력 조류량을 줄이고자 한다. 각각 발전기들 간의 기여도 차이를 이용하는 것은 수급조건을 만족시키면서 가장 빠르게 송전제약을 만족시킬 수 있기 때문이고, 여기서 기여도의 상대적인 차이를 상대 기여도라고 한다.

$$T_r(P_i) = (i-a)P_1 + (i-b)P_2 + (i-c)P_3 + \dots + (i-n)P_n$$

$$= \hat{a}_i P_1 + \hat{b}_i P_2 + \hat{c}_i P_3 + \dots + \hat{n}_i P_n \quad (21)$$

여기서, $\hat{a}_i, \hat{b}_i, \hat{c}_i, \dots, \hat{n}_i$ 가 상대 기여도이다. 초기 기준발전기에 의해 구해진 각각 발전기들의 상대 기여도와 그 발전기들의 기여도를 비교하여 상대 기여도보다 기여도가 더 큰 발전기들을 기준발전기로 정한다. 이들 기준발전기들은 발전량을 줄일 발전기가 된다. 식(21)을 이용하여 실제 송전선에 흐르는 조류량을 구하고 기준발전기가 실제 제약이 걸린 송전선에 미치는 영향력을 조사하고 그 영향력을 기준 ΔT 를 각각의 기준발전기별로 분배한다. 여기서 ΔT 는 송전제약에 걸린 전력조류를 의미한다. 각각의 기준발전기에서 줄인 전력량은 그 기준발전기 보다 기여도가 작은 발전기들이 상대 기여도를 기준으로 분배한 후 분배받은 만큼 출력을 늘림으로써 보상을 해준다. 그 식은 다음과 같이

$$\text{기준 발전기의 } P_i(\text{감소}) = \text{다른 발전기의 } \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (22)$$

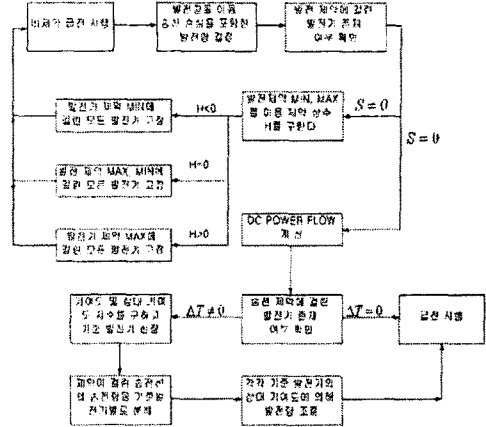
$$P_i \times \sum_{i=1}^n \text{민감도 } \% \text{ 상대 민감도 } \%_i = \Delta T, \quad (23)$$

송전제약에 걸린 전력조류를 줄이는 알고리즘은 다음과 같다.

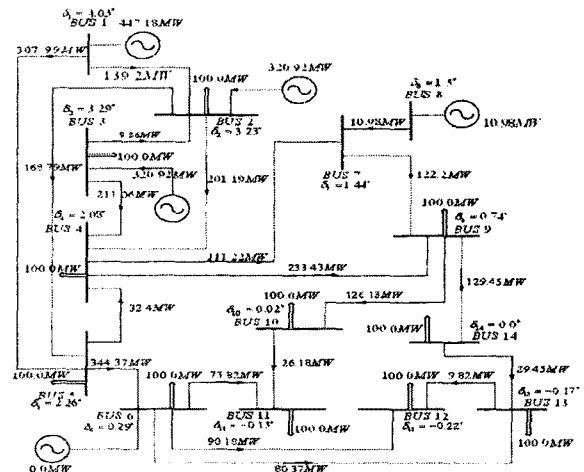
1. $\Delta h, S_L, S_V$ 지수를 이용하여 ED를 실행한다.
2. 기여도가 가장 큰 발전기를 초기 기준 발전기로 정하고, 상대 기여도를 구해서 기준발전기들을 정한다.
3. 실제 제약이 걸린 송전선에 흐르는 조류방정식을 구하고, 위에서 구한 ED값으로 각 발전기별 영향력을 구한다.
4. 영향력의 백분율을 기준으로 각각의 기준발전기별 ΔT_i 를 계산한다.
5. 식(23)을 이용하여 기준 발전기들의 감소량을 결정한다.
6. 각각 기준 발전기들을 기준으로 위의 2번부터 반복한다.

2.2 사례연구

<그림 2>와 같은 계통에서 선로 5-6에 송전제약이 300MW인 경우와 선로 1-5에 송전제약이 250MW인 경우의 사례연구를 한 결과치를 비교해 보면 다음과 같다.



<그림 1> 발전기별 상대 기여도 지수를 이용한 DC-OPF 알고리즘



<그림 2> 송전제약이 없는 경우 계통도

<표 1> 제안된 알고리즘과 기존 방법의 결과 비교

발전기	ED (Fortran)	ED (GAMS)	Line 5-6 (Fortran)	Line 5-6 (GAMS)	Line 1-5 (Fortran)	Line 1-5 (GAMS)
BUS 1	447.184	447.184	407.24	415.394	322.185	331.931
BUS 2	320.918	320.918	297.25	295.681	346.26	330.677
BUS 3	320.918	320.918	302.441	304.081	349.749	348.795
BUS 6	0.0	0.0	64.124	65.371	37.652	39.226
BUS 8	10.979	10.979	28.945	19.473	44.154	49.371
발전기 비용	19.4196	19.4196	19.4472	19.4456	19.4761	19.4702

<표 2> DC-OPF 와 AC-OPF 발전량 비교

발전기	ED (Fortran)	ED (GAMS)	Line 5-6 (Fortran)	Line 5-6 (GAMS)	Line 1-5 (Fortran)	Line 1-5 (GAMS)
BUS 1	447.184	447.184	407.24	411.539	322.185	334.974
BUS 2	320.918	320.918	297.25	296.842	346.26	326.358
BUS 3	320.918	320.918	302.441	303.208	349.749	341.115
BUS 6	0.0	0.0	64.124	66.334	37.652	49.27
BUS 8	10.979	10.979	28.945	25.704	44.154	51.819
	1100	1100	1100.0	1103.627	1100.0	1103.536

3. 결 론

본 논문에서는 송전선에서의 발전기별 상대 기여도 지수를 이용하여 송전제약을 하는 알고리즘을 DC-OPF로 제안하였다. 정확한 값은 아니지만 신뢰성 있는 값으로 계통입안이나 급전계획에 쓰일 수 있다는 것을 사례 연구를 통해서 보여줬고, 상대 기여도 지수를 이용한 알고리즘의 효율성 또한 보여줬다. 비선형을 선형으로 간략화 시킴으로써 복잡한 계통에 적용이 가능하고, 계산시간 또한 현저히 줄일 수 있는 방법인 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill Companies, international edition, 257-313, 1999
- [2] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", A Wiley-interscience Publication, 2nd Ed, 8-90, 1996
- [3] A.R FAHMIDEH-VOJDANI and F.D GALLIANA, "Economic Dispatch with Generation Constraint", IEEE TRANSACTION ON AUTOMATIC CONTROL, VOL AC_-25, NO.2, APRIL 1980
- [4] 송길영, 신변 전력계통공학, 동아출판사, 95-216