

선로용량 및 전압제약을 고려한 전력계통 최적운영

Optimal operation of power System considering security constraints.

발 표 자	서울대학교 공과대학
발 표 장	연북대학교 공과대학
시 보 자	연북대학교 공과대학

1. 서 론

전력계통의 최적제어에 관한 연구는, 전력계통의 중요분야로서 이차원적 연구는 계속되고 있다. [1][2]

이분야의 연구는 유한전력제어와 무한전력제어로 나눌수 있으며 최근에는 두분야를 합한 총체적인 제어도 발전되었다. 유한전력제어는 발전비용의 최소화이며, 무한전력제어는 선로손실의 최소화 혹은 발전비용의 최소화를 목적으로 하였다. 그러나 무한전력제어에서 발전비용의 최소화는 그 값이 유한전력제어에 비하여 상당히 크으며 또한 무한전력제어의 목적이 발전비용의 감소보다 전압의 안정화가 더 중요한 것이 일반적 연구의 결과이다.

본 연구는 발전비용의 최소화 및 전압의 안정화가 동시에 이루어 지도록 하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 선로용량 제약도 고려함으로써 계통 사고의 경우에도 사용 가능하도록 하였다. 그리고 본제의 해법으로서, 최근 그 고속성, 신뢰성, 용동성 및 본제정도

의의 적합성 등으로 크게 이용되고 있는 L.P 방법을 사용하였으며, 특히 뉴턴삼플렉스법과 상대안화법을 사용함으로써 계산시간의 단축에 기여하였다. 또한 본 알고리즘을 IEEE 24노선 38선로 모델계통에 적용하여 그 유용성을 입증하였다.

2. 본 론

(1) 문제의 구성

본 문제의 유한전력제어 부분과 무한전력제어 부분으로 구성되고, 이 두방법을 그대로 반복적용하여 최종적으로 최적운영해를 구한다.

A) 유한전력제어

본 문제는 선로 제약 조건을 만족하고, 발전전력의 상하한 값을 만족하며 경우에 따라서는 부하차단도 하도록 되어있다.

$$\begin{cases}
 \text{목적함수 } H_{\text{min}} \left[\sum_{i=1}^{NB} C_i P_i + \sum_{i=1}^{NB} \alpha_i (P_i^{\text{up}} - P_i) \right] \dots (1) \\
 \left. \begin{aligned}
 &P_i \leq P_i^{\text{up}} \leq \bar{P}_i \dots (2), \quad 0 \leq P_i \leq P_i^{\text{dn}} \dots (3) \\
 &\text{제약조건} \quad -\bar{P}_2 \leq P_2 \leq \bar{P}_2 \dots (4) \\
 &P_3 = V_3 \sum_k V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \dots (5)
 \end{aligned}
 \right\}
 \end{cases}$$

단, C_i, α_i 는 λ 모선의 평균연료비및 공급
 지장비용계수, $\bar{P}_g, \bar{P}_g^0, \bar{P}_g^s$ 는 발전출력및 발
 전력 상하한 값의 벡터, \bar{P}_L, \bar{P}_L^d 는 발전출력
 및 부하수요의 벡터, \bar{P}_e, \bar{P}_e^d 는 선로조류및 선
 로용량 상한, G_{jk}, B_{jk} 는 모선어드미턴스 유
 효부및 무효부

과 무효전력제어

무효전력제어는 전압의 상하한제한및 무
 효전력제어가능용량의 상하한제한및 모선의
 무효전력 방정식을 만족하는 조건하에서 높
 은 전압의 유지를 목적으로 하였으며 다음식
 들로 표시된다.

문
 제
 (I)
 목적함수
$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NB} (V_i^{\max} - V_i) \quad \dots (6)$$

제약조건
$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad \dots (7)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \quad \dots (8)$$

$$Q_{\lambda} = V_{\lambda} \sum_{k \in T} V_k (G_{\lambda k} \sin \theta_{\lambda k} - B_{\lambda k} \cos \theta_{\lambda k}) \quad \dots (9)$$

단, Q_{λ}, V_{λ} 는 λ 모선의 무효전력및 전압

Q_i^{\max}, Q_i^{\min} 는 λ 모선의 무효전력제어용량의
 상하한 값

V_i^{\max}, V_i^{\min} 는 λ 모선의 전압제한 상하한값이
 다.

c) 전력조류 계산^[8]

전력조류 계산은 본합뉴턴타프슨법에
 따랐으며 이 방법은 식(10)에 의하여, 식(11)
 과 같이 V, θ 를 수정해 나가는 방법이다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \theta &= H^{-1} \Delta P \\ \Delta V &= L^{-1} \Delta Q \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta^{(k+1)} &= \theta^{(k)} + \Delta \theta^{(k)} \\ V^{(k+1)} &= V^{(k)} + \Delta V^{(k)} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

(2) 문제의 해법

전력조류 계산을 하여 초기해 $V_i^0, P_i^0, Q_i^0, \theta_i^0, Q_i^{\max}, Q_i^{\min}$ 값을 조절하고 조류 계산을 풀어 식(9)를

를 구하고 문제(I),(II)를 반복 계산에 나간
 다. 문제(I),(II)는 비선형식이므로 초기온
 전점에서 선형화하여 뉴턴법및 랑그
 데안화법을 사용하여 구한다. 그림1과같다.

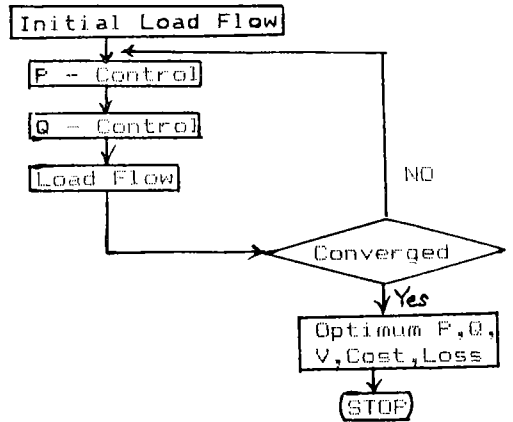


Fig1. Computational Sequence

A) 유효전력제어(P-control)

문제(I)에서 식(4),(5)는 비선형이므로
 온전점에서 선형화하면 문제(I)은 다음과
 같다.

$$\text{Min} \left[\sum_{i=1}^{NB} C_i \Delta P_i + \sum_{i=1}^{NB} \alpha_i \Delta P_i \right] \quad \dots (1')$$

$$\bar{P}_g - \bar{P}_g^0 \leq \Delta P_g \leq \bar{P}_g - \bar{P}_g^s \quad \dots (2')$$

$$-(\bar{P}_L^d - \bar{P}_L^0) \leq \Delta P_L \leq \bar{P}_L^0 \quad \dots (3')$$

$$-\bar{P}_e - \bar{P}_e^0 \leq \Delta P_e \leq \bar{P}_e - \bar{P}_e^0 \quad \dots (4')$$

$$\Delta P_S = J_{\Delta P}^{-1} [\Delta P_g^s - \Delta P_L^s] \quad \dots (5')$$

단, $\Delta P_m^k = \sum_{i=1}^{NB} \Delta P_m^k \cdot \Delta P_k$
 $\Delta P_m^k = V_p V_q (g_{pq} \sin \theta_{pq} - b_{pq} \cos \theta_{pq}) (Z_p - Z_q)$
 식(1)',(2)',(3)',(4)',(5)'로부터 발전력
 의 증감량 ΔP_g 및 부하차단량 ΔP_L 이 구해진
 다.

B) 무효전력제어(Q-control)

문제(II)에서 식(6),(7),(8)을 풀어서 Q_i^{\max}

만족시키는 값을 구한다.

식(10)을 사용하여 문제(II)를 변경하면

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n L_i \Delta Q_i \quad \dots \dots (6)'$$

$$V_i^{\text{min}} - V_i^{\circ} \leq L_i \Delta Q_i \leq V_i^{\text{max}} - V_i^{\circ} \quad \dots \dots (7)'$$

$$Q_i - Q_i^{\circ} \leq \Delta Q_i \leq Q_i - Q_i^{\circ} \quad \dots \dots (8)'$$

여기서 구한 ΔQ_i 로부터 Q_i 의 값이 예측된다.

$$Q_i^{\text{new}} = Q_i^{\text{old}} + \Delta Q_i \quad \dots \dots (12)$$

이 값은 다음의 네가지의 경우에 따라서 각각 아래와 같이 조정된다.

경우1) $Q_i^{\text{new}} > Q_i^{\text{max}} \Rightarrow Q_i^{\text{new}} = Q_i^{\text{max}}$ (P, Q 모션으로 됨)

경우2) $Q_i^{\text{new}} < Q_i^{\text{min}} \Rightarrow Q_i^{\text{new}} = Q_i^{\text{min}}$ (P, Q 모션으로 됨)

경우3) $Q_i^{\text{old}} < Q_i^{\text{new}} < Q_i^{\text{max}} \Rightarrow Q_i^{\text{new}} = Q_i^{\text{new}} + \alpha \Delta Q_i$

경우4) $Q_i^{\text{min}} < Q_i^{\text{new}} < Q_i^{\text{old}} \Rightarrow Q_i^{\text{new}} = Q_i^{\text{new}} + \alpha \Delta Q_i$

이렇게 조정된후, 전력흐름 계산을 하여 값이 최종적으로 결정된다.

c) 듀알심플렉스법 및 쌍대완화법의 적용

식(1)', (2)', (3)', (4)', (5)' 및 식(6)'

(7)', (8)'를 푸는데 있어서 듀알심플렉스법 적용의 이점을 간략히 보면 다음과 같다.

우선 제약조건(8)'를 만족하는 식(6)'의 최적해 ΔQ 는 cost 계수 순서에 따라 쉽게 구해지며 이 값은 듀알쌍대해가 되므로 듀알심플렉스법의 적용이 가능하며, LP의 Phase I이 전혀 불필요하다. 다음으로 이값은(7)'에 대입하여 만족하지 않는 것만을 제약조건으로 첨가하므로써, 제약조건수의 개수가 대폭 감소되므로, LP에 비해 계산시간이 현저하게 감소됨을 알수 있다.

(3) 모델계통에의 적용 결과

본 논문에서 제시한 알고리즘을 IEEE

24모선, 38선로 계통에 적용 해본 결과를 요약하면 다음과 같다.

Table1. Results of the Proposed Method

	Initial	Iteration 1		Iteration 2	
		P	Q	P	Q
Cost	656.07	632.44	634.39	627.39	627.54
Loss	0.3920	0.3757	0.4364	0.4557	0.4634

표2에서 보는바와 같이 초기전압이 제약조건 내에서 많이 개선된 것을 볼수 있으며 발전비용도 4.4% 감소된 것을 알수 있다.

표1에서 보면 반복과정에서, P에서Q로 가는 과정은 비용의 증가를 가져오나, 궁극적으로는 비용감소와 더불어 전압개선 효과도 아울러 얻기때문에, 효과적인 것으로 나타났다.

Table2, Initial and Final value of the proposed method

Bus #	Bus V		Generation Power	
	Initial	Final	Initial	Final
1	1.0000	1.0000	0.5	0.5
2	0.9895	1.0693	0.	0.
3	0.9763	1.0260	0.	0.
4	1.0113	1.0310	0.	0.
5	1.0012	1.0059	0.	0.
6	1.0054	1.0345	4.0	3.0
7	0.9521	0.9687	0.	0.
8	0.9972	1.0067	0.5	0.4
9	1.0000	1.0227	0.5	0.5
10	0.9812	1.0099	0.	0.
11	1.0000	1.0964	6.6	6.8955
12	0.9259	0.9494	0.	0.
13	1.0000	1.1173	0.	0.
14	0.9409	1.0380	0.	0.
15	1.0000	1.1508	1.92	2.4526
16	0.9664	1.0724	0.	0.
17	1.0000	1.1473	1.92	1.0
18	0.9608	1.0000	0.	0.
19	1.0000	1.0000	2.83	2.9555
20	0.9907	1.0461	0.	0.
21	0.9726	0.9958	0.	0.
22	0.9657	1.0111	0.	0.
23	0.9824	1.0228	0.	0.
24	1.0000	1.0000	2.0	1.7563
Cost		656.0654	627.5475	
Loss		0.3920	0.4634	

* Upper Limit of V = 1.15
* Lower Limit of V = 0.95

3. 결 론

본 논문은 유효전력제어에 있어서 선로 조류 제약을 고려했을뿐만 아니라 무효전력 제어에 있어서는 종래의 운전비 감소의 관점보다 더욱 중요한 것으로 판명된 안정도의 관점에서 제어를 하였으며, 모델계통의 적용결과 다음과 같은 우수성이 입증되었다.

- 1) 선로조류 제약을 고려하였다.
- 2) 무효전력제어결과 전압을 들수 있는 데로 높게 유지시켰다.
- 3) 운전비 감소에 있어서 많은 개선을 가져왔다.
- 4) 상태완화법을 사용하므로써 대규모 계통에 도입이 가능하다.
- 5) 본 알고리즘을 모델계통에 적용시켜본 결과 실시간제어에 이용 가능성이 입증되었다.

4. 참고문헌

- 1) A.M.H.Rashed and D.H.Kelly, "Optimal Load Flow Solution Using Lagrangian Multipliers and the Hessian Matrix", Paper T74 160-8, presented at the IEEE PES Winter Meeting, N.Y, Jan., 1974.
- 2) Y.M.Park and Y.S.Paek, "Study on the Optimal Power Operation Considering Line Contingencies", Jour. of KIEE, vol33, No6, May 1984, pp241-246
- 3) J.Peschon, W.F.Tinney et, "Optimum Control of Reactive Power Flow"

IEEE Trans. vol.PAS-87, No1, Jan. 1968. pp40-48

- 4) I.Hano et, "Real time control of System Voltage and Reactive power" IEEE Trans., Vol.PAS-88, No,10, Oct. 1969, pp1544-1559
- 5) E.Hobson, "Network constrained Reactive power Control Using Linear Programming", IEEE Trans. Vol, PAS-99, No.3, May/June 1980, pp868-877
- 6) Jai-kil Chung, Y.M.Park, "A study on the Optimum Operational Control of Power System", Jour.of KIEE Vol33, No.10, oct, 1984
- 7) Y.M.Park, K.Y.Lee, "A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch", IEEE Trans. Vol. PAS-104, No.5, May, 1985, pp1147-1153.
- 8) Y.M.Park, Y.S.Paek, "An Improved Fast Decoupled Newton Raphson Load Flow Study", Jour.of KIEE. Vol.26, No 2, Mar.1977
- 9) G.Blanchon, J.C.Dodu, "Developing a New Tool for Real-Time control in order to Coordinate the Regulation of Reactive Power and the Voltage Schedule in Large-Scale EHV power Systems", GIGTE-IFAC Symposium, Florence, 26-28, September, 1983.