



(AUGMENTED LAGRANGIAN FUNCTION) 은 식 7)과 같이 나타낸다. 페널티 기법은 한계치를 위반한 변수에 대하여 페널티 함수를 이용하여 해 가능 영역에서 최적해를 구하기 위하여 사용하였다.

$$L^*(Z) = L(Z) + P_{Yi}(Z) \quad 7)$$

2차 페널티 함수는 식 8)과 같이 나타낸다.

$$P_{Yi}(Z) = 0.5 S_i (Y_i - Y_i^{Limit})^2 \quad 8)$$

여기서  $S_i$  : 페널티 가중 계수  
 $Y_i^{Limit}$  : 제약변수의 상·하한치값

식 7)은 뉴턴 OPF에 의한 라그랑제 함수의 최적화 행렬로 나타내면 식 9)과 같다.

$$\begin{bmatrix} H(Y, \lambda) & -J(Y) \\ -J(Y)^T & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G(Y) \\ -G(\lambda) \end{bmatrix} \quad 11)$$

또는 간단히  $W \Delta Z = -g$  (12)  
 또 표현한다. 그리고 부하 모델식은 식 13)과 같다.

$$PD_i = PD_{0i} V_i \quad \alpha_i$$

$$QD_i = QD_{0i} V_i \quad \beta_i \quad (i = 3, 5, 6) \quad 13)$$

여기서  $PD_{0i}, QD_{0i}$  : 초기치

$\alpha_i, \beta_i$  : 계수

부하모델을 사용할 경우  $g$ 와  $W$ 의  $\partial L / \partial V_i$ 와  $\partial^2 L / \partial^2 V_i$  요소에 부하모델의 미분치를 더해 주어야 한다.

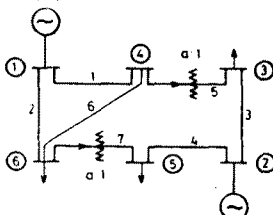
식 12)는 반복과정에서 얻어진 해가 최소인지 아닌지를 검증하기 위해서 식 12)의  $W(\Delta Z)$  행렬이 양의 값 (Positive Definite)이 되어야 한다.

그러나 대규모 계통에서는 이러한 검증은 상당한 계산 시간이 걸리기 때문에 다음과 같은 간접적인 방법을 이용한다.

- 1) 등식제약 조건은 허용오차를 포함하여 모두 만족하여야 한다.
- 2) 상, 하한값을 위반하지 않은 모든 변수의 Gradient 값이 0 일것
- 3) 액티브 제약세트의 변수는 다음의 라그랑제 미정 계수의 부호 검증에 만족할 것:
  - \* 제약 변수의 값이 상한치일때 라그랑제 미정 계수가 (-)이다.
  - \* 제약 변수의 값이 하한치일때 라그랑제 미정 계수가 (+)이다.

### 3. 사례 연구

그림 1)과 같은 6 BUS-7 LINE Ward - Hale 계통의 HALF LOAD 를 모델로 사용한다. 모선 1과 2 는 발전기 모선이고, 모선 3,4,5 는 부하모선이다. 목적함수는 모선 1과 모선 2의 발전비용을 최소로 하는 것으로 하고, 제어 변수는 변압기 탭 (T43, T65) 과 유효 전력 발전 ( $P_1, P_2$ )이다.



BASE ( 50 MVA )  
 그림 1) 모델 계통  
 fig 1. Model System

모델계통에서 발전기의 연료특성 등에 대한 비용함수가

$$F_1 = 5.0 + 40 PG_1 + 120 PG_1^2 \quad [$/hour]$$

$$F_2 = 4.0 + 29 PG_2 + 110 PG_2^2 \quad [$/hour] \quad 14)$$

이라고 가정하면, 목적함수  $F$ 는  $F_1$ 과  $F_2$ 의 합으로 나타낸다. 모델 계통의 OPF 문제는 식 15), 16), 17)로 구성 된다.

$$\text{Minimize } F = F_1 + F_2 \quad 15)$$

$$\text{등식 제약 } \Delta P_i = 0$$

$$\Delta P_i = 0 \quad (i = 1 \dots 6) \quad 16)$$

부등식 제약식

$$10 \leq PG_1 \leq 100$$

$$10 \leq PG_2 \leq 100$$

$$-20 \leq QG_1(y) \leq 100$$

$$-20 \leq QG_2(y) \leq 100$$

$$0.90 \leq T_{ij} \leq 1.10 \quad (ij = 43, 65)$$

$$0.95 \leq V_j \leq 1.05 \quad (j = 1 \dots 6) \quad 17)$$

원래의 문제를 등식제약 조건을 고려한 라그랑제 함수로 변형시키면 식 18)과 같다.

$$L(Y, \lambda) = F - \sum_{i=1}^6 \lambda p_i \Delta P_i - \sum_{i=1}^6 \lambda q_i \Delta Q_i \quad 18)$$

모델 계통에서  $y$  는

$$y = [ PG_1 \ PG_2 \ T_{43} \ T_{65} \ V_1 \ \theta_1 \ V_2 \ \theta_2 \ V_3 \ \theta_3 \ V_4 \ \theta_4 \ V_5 \ \theta_5 \ V_6 \ \theta_6 ]^T \quad 19)$$

과 같은 구조를 갖는다.

### 4. 결과 검토

본 논문에서 제시한 기법의 효용성을 입증하기 위하여 부하 모델의 계수와 SLACK BUS의 전압 지정값을 변화시킬때의 시뮬레이션 결과를 나타내면 표 2), 3), 4)와 같다.

표 1)은 부하모델만 적용하고 SLACK BUS를 지정하지 않은 경우이다. 이 경우 부하단, 즉 3, 5, 6 모선의 전압이 목적 함수를 최소화 하기 위하여 전압을 낮춤으로써 부하를 줄이려는 경향때문에 모두 Lower Limit 값을 갖는다. 그러나 전력 계통 운전에서 Lower Limit로 운전하는 것은 계통의 상태가 조금만 변하더라도 전압의 하한치를 벗어나게 되므로 계통 운용상에 문제를 초래할 수 있다. 그러므로 발전비용을 최소로 하지만 계통 안전운전면에서는 바람직 하지않다. 표 1)에서  $L$ 는 제약변수가 Lower Limit 에 Binding 되었다는 것이다. Active Constraint Set 을 제외한 모든 변수의 Gradient 가 모두 영이 됨을 알수있다.

표 2)는  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 를 각각 1.0과 1.5로 한 경우이고, 표 3)은  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 를 각각 1.2과 1.5로 한 경우이다. 그리고 표 4)는  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 를 각각 1.2과 1.2로 한 경우이며, SLACK BUS 전압을 각각에 대해서 1.0, 1.05, 1.1로 고정시켰을때 얻은 결과이다.

표 2,3,4에서 SLACK BUS 전압을 1.0으로 고정시켰을 때는 경우 부하단의 전압이 모두 하한값을 갖는다. 이 경우는 기준모선의 전압이 낮게 지정되어 계통 전압이 전체적으로 낮아진다. 그리고 기준모선의 전압을 1.1로 고정시켰을 때는 모선 6의 전압이 1.0인 경우보다 증가하였음을 알 수있다.

모선 3과 5의 전압이 하한치를 갖게 되는데 모선 2(발전기 모선)의 전압을 1.1로 지정 하면 개선될 것으로 사료된다.

이와 같은 시뮬레이션 결과로 부터 기준모선의 전압

을 1.1로 고정시켜온전하는 것이 적정 전압 공급을 위하여 바람직하다는 결론을 얻었다.

6. 결 론

본 논문에서 제시한 OPF 기법을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 새로운 OPF는 비선형 최적화 문제를 단순화 시켰고, 해법이 간단 하다.
2. 유효 전력과 무효전력의 종합제어가 가능하다.
3. Active Set 을 적용이 결정하므로써 제어변수나 부류식 조건의 수에 관계없이 최적해의 계산시간과 기억용량을 감소할 수 있다.
4. 부하 모델을 적용할 경우 부하부선 전압들이 상한치에서 하한치로 바뀔으로써 계통의 상태가 조금만 변하여도 전압의 하한치를 넘어나게 되므로 계통 운용상의 문제를 초래할수있다. 이를 개선하기 위해서는 기존 모선의 전압값을 1.1 로 지정하는것이 바람직하다.
5. 새로운 OPF의 최적해 과정은 적절한 Enforce Tolerance를 결정 하는것이 가장 큰 문제점으로 사료된다.

6 참고 문헌

1. D. I. Sun, B. Ashley, B. Brewer, A. Hughes, W. F. Tinney " Optimal Power Flow Solution by Newton's Approach " IEEE Trans Vol. PAS - 103 No. 10, PP 2864 - 2880, Oct. 1984
2. D. I. Sun, B. A. Hughes, W. F. Tinney, J. M. Bright, J. Lamont " Optimal Power Flow Solution by Newton's Method " IEEE Tutorial Course Text 87EH0262-60PWR, PP. 35 - 48, 1987
3. W. F. Tinney, V. Brandwajn, S. M. Chen, " Sparse Vector Methods ", IEE Trans Vol. PAS-104, No. 2, PP 295 - 391, Feb, 1987
4. D. I. Sun, T. Hu, G. Lin, C. Chen " Experiences with Implementing Optimal Power Flow for Reactive Scheduling in the Taiwan Power System ", IEE/PES Summer Meeting Paper 87SM505-1, July 1987
5. R. Y. Kwok, " Optimal Power Flow in Power System Analysis " Energy Systems Research Center, The University of Texas at Arlington, Dec. 1987

	ANGLE	ANGLE	ANGLE
PG <sub>1</sub>	16.590	16.193	15.664
PG <sub>2</sub>	16.249	17.967	18.032
QG <sub>1</sub>	13.359	13.658	6.718
QG <sub>2</sub>	-2.100	-2.214	3.221
T <sub>23</sub>	1.072	1.016	0.996
T <sub>45</sub>	1.033	0.979	0.984
V <sub>1</sub>	1.1 *	1.05 *	1.0 *
V <sub>2</sub>	0.99982	0.99964	1.04018
V <sub>3</sub>	0.95	-3.7741	0.95
V <sub>4</sub>	1.03815	-2.6462	0.98256
V <sub>5</sub>	0.95	-2.0526	0.95
V <sub>6</sub>	1.02162	-3.2906	0.96778
P <sub>Loss</sub>	1.881	1.8745	1.6536
F	27.894	28.385	27.032

표 2) α<sub>1</sub> = 1.0, β<sub>1</sub> = 1.5 인 부하 모델

VARIABLE NAME	SOLUTION VECTOR	GRADIENT VECTOR	LIMIT LOWER	LIMIT UPPER
PG1	.31293	.17208457D-14	.2000	2.0000
PG2	.36157	-.13183898D-14	.2000	2.0000
T43	.99532	-.13165719D-10	.9000	1.1000
T65	.98698	.22858537D-10	.9000	1.1000
THETA1	.00000	-.00000000E+00		
V1	.99766	-.58440537E-10	.9500	1.0500
LANDAP1	-38.77587	-.16464607D-12		
LANDAQ1	.00000	-.52510784D+00		
THETA2	.06778	.33889197D-10		
V2	1.04802	-.36417015D-11	.9500	1.0500
LANDAP2	-34.38636	-.11934898D-13		
LANDAQ2	.00000	-.48451547D+00		
THETA3	-.07715	-.27911841D-10		
V3	.95000	.10388990D+02	.9500	1.0500
LANDAP3	-40.28976	-.97531981D-13		
LANDAQ3	-.48802	-.18717011D-12		
THETA4	-.05796	-.25803501D-10		
V4	.95578	-.69899907D-07	.9500	1.0500
LANDAP4	-40.08700	-.12512907D-12		
LANDAQ4	-.46194	.39835015D-08		
THETA5	-.05150	-.46277769D-11		
V5	.95000	.47200901D+01	.9500	1.0500
LANDAP5	-39.57119	-.13348349D-12		
LANDAQ5	-.53350	-.75861705D-13		
THETA6	-.07188	-.82661341D-12		
V6	.95000	.95492262D+01	.9500	1.0500
LANDAP6	-40.00890	-.23758773D-12		
LANDAQ6	-.52826	-.12723007D-12		

FUNCTION NAME	FINAL Q GENERATION	LIMIT LOWER	LIMIT UPPER
QG1	.12611	-.4000	2.0000
QG2	.08452	-.4000	2.0000

표 1) 부하모델 만 적용한 경우

	ANGLE	ANGLE	ANGLE
PG <sub>1</sub>	16.539	18.065	15.476
PG <sub>2</sub>	16.118	17.770	17.891
QG <sub>1</sub>	15.089	15.334	6.799
QG <sub>2</sub>	-3.451	-3.533	3.680
T <sub>23</sub>	1.064	1.009	0.996
T <sub>45</sub>	1.019	0.965	0.985
V <sub>1</sub>	1.1 *	0.0	1.05 *
V <sub>2</sub>	0.98823	7.2535	0.98454
V <sub>3</sub>	0.95	-3.7073	0.95
V <sub>4</sub>	1.03031	-2.5822	0.97654
V <sub>5</sub>	0.95	-1.9559	0.95
V <sub>6</sub>	1.01351	-3.1936	0.95970
P <sub>Loss</sub>	1.971	1.9559	1.6322
F	27.76	27.15	26.77

표 3) α<sub>1</sub> = 1.2, β<sub>1</sub> = 1.5 인 부하 모델

	ANGLE		ANGLE		ANGLE	
PG <sub>1</sub>	16.537		16.062		15.473	
PG <sub>2</sub>	18.118		17.767		17.897	
QG <sub>1</sub>	15.221		15.471		6.799	
QG <sub>2</sub>	-3.446		-3.522		3.812	
T <sub>43</sub>	1.064		1.008		0.996	
T <sub>65</sub>	1.018		0.964		0.985	
V <sub>1</sub>	1.1 *	0.0	1.05 *	0.0	1.0 *	0.0
V <sub>2</sub>	0.98626	7.2555	0.98463	6.9046	1.04439	4.015
V <sub>3</sub>	0.95	-3.7027	0.95	-3.9203	0.95	-4.334
V <sub>4</sub>	1.02987	-2.5777	0.97604	-2.7782	0.95643	-3.2464
V <sub>5</sub>	0.95	-1.9506	0.95	-2.1616	0.95	-2.8584
V <sub>6</sub>	1.01303	-3.1872	0.95905	-3.3263	0.95	-4.0280
P <sub>Loss</sub>	1.9743		1.9589		1.6341	
F	27.759		27.145		26.775	

표 4)  $\alpha_1 = 1.2$ ,  $\beta_1 = 1.2$  인 부하 모델