

PSS/OPF를 이용한 실계통 전압 불안정 해석

최 흥 관 문 영 환
한국전기연구원

이병준
고려대학교

Analysis of Power System Voltage instability using PSS/OPF

H.K. Choi Y.H. Moon
KERI

B.J. Lee
Korea University

Abstract - Stability aspects have often been incorporated in the dispatch/pricing procedure using trial and error methods, or approximated in the dispatch optimization directly as a set of linear constraints on generation/transmission. This paper presents introduction of PSS/OPF and voltage instability analysis using the program. Additional advantages offered by PSS/OPF are easier procedures, less computation and avoidance of engineering judgement in identifying the amount of shunt requirement at the candidate buses.

1. 서 론

현재 국내 전력산업의 구조개편이 진행중이며, 전력시장 운영체제 하에서는 전력시스템의 안전도 확보가 더욱 중요하게 대두될 전망이다. 이때 예상되는 문제점의 하나가 전압 안정도이다. 그동안 최적조류계산은 국내에서 연구가 일부 진행되고 있으나 향후 계통의 혼잡관리와 더불어 에너지와 예비력의 최적화 등 그 중요성이 점차적으로 커질 것으로 판단되며, 이에 따라 국내 기술로 프로그램 개발이 활성화 될 것으로 보인다. 그러나 세계적으로도 이러한 전압안정 제약을 가진 최적조류계산 프로그램에 대한 검증이 최근에야 이루어지고 있으며, 기존에 확보된 조류계산 데이터를 최적조류계산 프로그램으로 입력하기 위한 컨버전에 오히려 더 많은 시간이 소요되고 있다.[2] 따라서 본 논문에서는 국내에서 가장 많이 사용하는 PSS/E 조류계산 데이터를 그대로 사용할 수 있는 PSS/OPF 프로그램 소개와 더불어 국내 실계통을 대상으로 하여 전압불안정/붕괴를 분석하는 방법을 보였다.

취약한 전압조건들에 대한 상정사고의 연구와 이를 극복하기 위하여 제어와 설정을 결정하였으며 또한 가장 임계점의 요소들에 대한 유용한 정보를 얻었다. 목적함수로는 모션 shunt var의 투입 최소화, 모션 부하 조정 최소화 등을 사용하여 전압 불안정을 분석하였다.

2. PSS/OPF

2.1 최적조류계산 개요

일반적인 조류계산은 국부적인 모션전압을 제어하기 위하여 전력방정식에 의해 발전기 무효전력의 출력, 변압기 탭, 위상변환기의 위상각 등을 제어하지만, 최적조류계산은 계통 전체의 손실을 최소화하는 등의 목적함수를 등호, 부등호 제약조건들을 적용하여 일반 조류계산 제어변수 보다 더 많은 변수들(유효전력 급전, 변압기 탭, 위상 변환기 각, 분로 capacitor 투입, 직렬 보상, 부하 차단 등)을 제어하여 포괄적으로 계산하고 있다.

2.2 최적조류계산 해결 기법

2.2.1 기본 해법 - 비선형 문제

OPF는 많은 비선형 문제를 안고 있으며 이에 대한 최적의 해를 찾아내기 위해서 PSS/OPF에서는 주어진 제약조건들을 만족하면서 목적함수를 최소화 하도록 제어 변수들을 이동시키는 비선형 최적화 기법을 사용하고 있다.

$$L(x, \lambda) = f(x) + [\lambda]^T [h(x)]$$

$$h(x) = 0, \quad x_{Min} \leq x \leq x_{Max}$$

여기서 x 는 계통 변수이고, $f(x)$ 는 목적함수, $h(x)$ 는 제약조건, λ 는 라그랑제 승수 변수이다.

라그랑제 함수는 계통변수들과 라그랑제 승수 모두 표현되며 이는 결과적으로 이중 변수 문제로 귀결된다. 등호 제약조건으로 풀려진 최적해는 함수의 gradient를 zero 로 놓고 x 와 λ 에 대하여 해를 구하는 이른바 Kuhn-Tucker 최적 조건을 적용하여 라그랑제 고정점을 결정한다. 제약조건들에서의 변화에 대한 목적함수 감도와 함께 최적으로 정립된 계통 변수들이 KT 문제를 해결함으로써 얻어진다.

2.3 불평형 제약

불평형 제약을 풀기 위해서 한계치를 적용하는 방식에 따라 soft, hard limit의 두 가지 방법이 있다. hard limits는 변수의 한계치에 점근적으로 근접하는 목적함수 수식을 도입하는 것이며, soft limits는 실행 불가능 영역에서 정의되며 동시에 한계치에 위반된 정도를 크기로 표현하는 수식을 도입하여 해를 구하는 방법이다.

2.3.1 soft limits

다음은 soft limits penalty로서 선형 2점법과 2차 penalty의 두 가지 중에서 2차 penalty를 나타낸다. 두 한계 최소/최대치의 중심점에서 떨어진 정도를 제곱하여 표현하고 있다.

$$\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \left(x_i - \frac{(x_{i, min} + x_{i, max})}{2} \right)^2$$

여기서:

- N = 2차로 페널티를 가진 제어 변수의 수,
- x = 제어 변수 현재 값(per unit),
- x_{min} = 제어 변수 최소 값 (per unit),
- x_{max} = 제어 변수 최대 값 (per unit),
- ρ = vector penalty weight.

다음은 위반 한계치로부터 변수의 이탈 정도에 직접적으로 비례하여 값을 나타내고 있는 선형 penalty 식이다.

$$\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot (\max(0, x_i - x_{max,i}) - (0, \max(0, x_i - x_{min,i})))$$

2.3.2 Hard limits

hard limits는 부등호 한계치의 최대값과 최소치를 벗어나지 않도록 Log 수식을 도입하는 방법으로 barrier

함수라고 불린다. 즉 지정한 영역의 밖에서는 x의 값이 정의되지 않기 때문에 실행 가능한 영역사이에서 울타리가 형성되는 것이다. PSS/OPF는 다음과 같은 log barrier 함수를 사용한다.

$$B(x) = -(10^{-\mu}) \sum_{i=1}^N \{ \log(x_i - x_{MIN,i}) + \log(x_{MAX,i} - x_i) \}$$

이러한 함수의 추가로 제약화된 문제를 쉽게 풀수 있는 비제약문제로 변환이 가능하며, 그 해가 x_{MIN} 과 x_{MAX} 의 한계치 내인 x의 실행가능한 영역사이에 항상 존재하게 되어 interior point 방법이라고도 불린다.

이러한 식이 비선형 문제의 정식화로 포함될 때 확대된 라그랑지안 L' 은 다음과 같다.

$$L'(x, \lambda) = f(x) + B(x) + [\lambda]^T [h(x)]$$

$$h(x) = 0.$$

여기서:

$B(x)$ = 불평형 제약조건을 만족하는 barrier 수식

결국 초기에 주어진 문제는 목적함수 $f(x)$ 의 제약화된 최소값을 찾는 것이었으나, 새로운 식에서는 $f(x) + b(x)$ 의 조합된 목적함수의 최소값을 찾는 것이며, 이는 barrier parameter μ 를 감소시킴으로서 얻을 수 있다. 보통 이 값은 -4에서 최종 수렴된다.

다음은 이러한 개념을 보여주는 것으로 $x_{MAX} = 1.0$ 인 경우, barrier 상수의 값이 1과 2일 때의 궤적을 나타내고 있다.

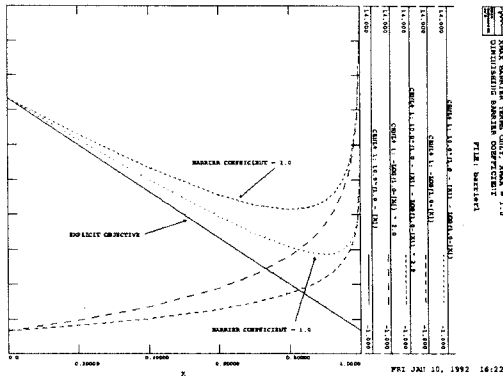


그림 2.1 목적함수와 barrier 수식의 조합

2.4 Iterative Strategy

확대된 라그랑제 함수가 정식화되면, 이러한 비선형 문제의 최적해는 뉴턴의 2차 해법으로 구해진다. 표준적인 Kuhn-Tucker 조건들을 고려하면 다음 식처럼 정식화할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \nabla_x \nabla_x L'(x, \lambda) & \nabla_x \nabla_\lambda L'(x, \lambda) \\ \nabla_\lambda \nabla_x L'(x, \lambda) & \nabla_\lambda \nabla_\lambda L'(x, \lambda) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla_x L'(x, \lambda) \\ -\nabla_\lambda L'(x, \lambda) \end{bmatrix}$$

위의 식에 대한 해는 x와 λ , 두 개의 변수에 대한 보정값을 제공하며 비선형 계통에 대한 2차 간략화식을 풀 수 있다. 변수 보정은 계통식의 우반부(RHS)에 의해서 이루어지고, RHS 행렬에서 λ gradient 수식인 $-\nabla_\lambda L'(x, \lambda)$ 는 mismatch를 감소시키는 방향으로 x의 값을 이동시키는 역할을 한다. 또한 $-\nabla_x L'(x, \lambda)$ 는 조합된 목적함수를 최소화하는 방향으로 x를 이동시킨다.

좌반부의 KT 정방행렬의 네 식은 자체로 행렬이며 라

그란지안이 λ 에서 선형이므로, 하대각 부분행렬은 유일하게 zero이다. 비대각 부분행렬들은 단순히 등호제약식의 도함수이고 자코비안($M \times N$)과 그의 전치($N \times M$)이다. PSS/OPF에서는 상대각 부분행렬에 대한 빠른 참조를 위해서 헤시안을 사용하고 있다.

뉴턴의 2차 해법은 조합된 목적함수를 x에 대한 2차식으로 간략화 할 수 있다.

2.4.1 반복 해법

앞에서 설명한 보정값에 대한 알고리즘은 추정된 x와 λ 에 대하여 KT 문제 정식화를 통하여 보정값을 계산하고 업데이트하는 반복적인 방법이다. KT 문제의 정식화는 초기 추정값을 사용하여 다음식과 같이 수행된다.

$$x' = x_{old} + \alpha \Delta x$$

$$\lambda' = \lambda_{old} + \alpha \Delta \lambda$$

계산된 보정값 또는 $\text{step}(\Delta x)$ 은 2차식의 새로운 최소값을 결정하며 이러한 점에서 새로운 2차식이 개발되고 새로운 step이 계산된다. x' 이 비선형 최적값에 접근하기 때문에 2차식의 최소값이 조합된 비선형 목적함수의 최소값으로 수렴하게 된다. 2차 해의 추정이 최적값으로부터 먼 x' 에 대하여 계산 될 경우, step 때문에 x의 요소가 한계치를 벗어나게 되는 결과를 초래할 것이다. 이러한 경우에는 Δx 의 값을 줄이는 방법을 사용하여야 한다. PSS/OPF의 반복 수행 결과에서 나타나는 step은 per unit이고, 1.0의 step은 보정의 100%가 한계치를 벗어나지 않고 x' 에 첨가될 수 있음을 뜻한다. 반면에 나타난 step이 1.0보다 적을 경우 x를 가장 크게 제한하는 요소가 보정값을 얼마나 많이 줄였는가를 나타낸다.

2.4.2 Barrier Terms 감소

barrier terms는 해를 구하는 절차를 통하여 감소되는데, 각 횟수에서 0.5 또는 그 이상의 안전한 step 값이 사용되며 barrier 상수는 10(지수함수로는 1씩)으로 나누어진다. 표준적으로 1.0($\mu=0$)에서 시작하여 0.0001($\mu=4$)에서 끝난다.

$$\mu_k = \mu_{k-1} - 1$$

2.4.3 해 계산의 반복 결과

OPF의 해를 구할 때 반복 횟수 마다 프로그램에서 출력하는 결과를 요약하면 다음 표와 같다.

표 2.1 반복 계산 결과의 표시 항목

Iter	반복 횟수, x는 bad iteration을 의미
Mu	barrier 상수, 0부터 -4까지
NL Objective	barrier 식을 제외한 모든 목적함수의 합
Norm RHS	KT 문제에서 우반부의 가장 큰 절대값
Mismatch(pu)	전력 조류 방정식에서 가장 큰 mismatch
Row	가장 큰 mismatch의 자코비안 row
Nearest	step 크기를 제한하는 가장 큰 요소
Step	step 크기, 1.0 또는 작은 값
NE	음의 고유치

실계통을 대상으로 할 때, 정상적으로 최적해를 구하지 못한 경우에 위에 요약된 항목을 참조하여 파라미터를 달리 적용해 주어야 할 경우가 대부분이다. 또한 최적해를 구한 경우라도 해석시 필요한 중요한 정보들을 얻을 수 있다.

부적당한 반복에 대한 판별 기준은 다음과 같고 반복횟수 숫자 바로 옆에 "x"가 표시된다.

- K번째 반복계산의 mismatch > K-1번째 mismatch의 95%
- K번째 반복계산의 목적함수 값 > K-1번째 목적함수 값

2.4.4 해의 수렴 판정 기준

다음과 같은 기준들이 동시에 만족 될 때 수렴된 것으로 판정하고 최적화된 결과를 제시한다.

- barrier 파라미터의 최종 값이 구해질 때(표준적으로 $\mu = -4$)
- 단위 step이 최종 반복에서 사용될 때("step" = 1.0)
- mismatch와 RHS(옵션)가 지정한 수렴오차(TOLN) 내로 들 때
- Clamp 오차의 최종 값이 구해 진 경우(비최적화된 발전기들만 해당)

2.4.5 비정상적 종료 및 해결방법

PSS/OPF를 실행시, PSS/E와는 달리 비정상적인 종료를 알리는 여러 메시지를 자주 접하게 된다. 이는 데이터의 문제보다는 디폴트로 주어진 반복 횟수 등의 제한치를 초과함으로써 발생하는 경우가 많으며 대표적인 예러들은 다음과 같다.

■ Error: 2011. Too many linearizations. Max: 20

파라미터 옵션에서 ITMXN 값을 더 크게 함으로서 해결할 수 있다.

■ Error: 2009. Problem seems infeasible:

이러한 예러를 만날 경우에는 iteration log나 OPF report file을 참조하여 정보를 습득하면서 경험과 발견성을 익히는 것이 중요하다. 이러한 파일에는 제약화된 변수들의 목적함수 감도 정보를 제시되고 있으며, 이러한 감도들의 상대크기를 비교함으로써 가장 penalty가 높은 제약함수를 알 수 있기 때문이다. 이를 통하여 부가적인 제어변수의 도입이나 한계치의 완화등을 적용할 수 있다. 한계치의 경우 해결 방법으로는 다음과 같은 방법들이 있다.

- 만약 barrier 파라미터가 큰 경우($\mu \approx -2$ 또는 그 이상)에 부적당한 반복의 연속 횟수가 파라미터 옵션의 bad iteration Coarse Limit과 같은 경우 이 값을 늘려 줌으로서 해결 할 수 있다.
- 만약 barrier 파라미터가 적은 경우($\mu \approx -2$, 이하)에 부적당한 반복의 연속 횟수가 파라미터 옵션의 bad iteration Fine Limit과 같은 경우 이 값을 늘려 줌으로서 해결 할 수 있다.
- step 크기가 최소 barrier step size 허용오차 아래에 있을 때

이처럼 파라미터값을 디폴트 값보다 더 크게 수정한 경우는 필연적으로 계산시간의 증가를 가져오기 때문에 유의할 필요가 있다.

■ MA27 Math Error

거의 볼 수 없는 예러이며 이는 프로그램상의 문제인 경우가 많으므로 제작사에 문의를 하는 것이 바람직할 것이다.

이상에서 infeasibility를 해결하기 위한 방법을 요약하면 다음과 같다.

1. 경계에서 변수 조사
2. 제약조건 완화
3. 제어 추가
4. 반복 한계치 증가
5. 수렴 허용오차 증가

3. 전압 불안정/붕괴 해석

3.1 전압 불안정/붕괴 해석법

전압 문제를 PSS/OPF로 해결하기 위해서는 다음과 같은 절차를 통하여 해석할 수 있다.

1. 기본 케이스에 특정한 상정사고 적용
2. 나쁜 전압 조건을 풀거나 수렴하지 않는 상정사고에

대하여 심화 조사

3. 상정사고를 극복하기 위하여 필요한 설정이나 제어를 결정
4. 계통에서 가장 임계점의 요소에 대한 유용한 정보 취득

대상은 2001년 첩두부하시의 조류계산 데이터를 기본 케이스로 PSS/OPF version은 26.2버전 이상을 사용하였으며 상정사고는 보령의 발전기들이 정지했을 경우이다.

3.1.1 Adjustable Bus Shunt Controls

전통적인 반복 접근법에 의한 절차는 후보 모선을 선정하고, var 크기를 추측하여 각 모선에서 var 용량을 점차적으로 감소시키거나 증가시켜 Q-V 해석을 하게 되는데, 이러한 방법은 대단히 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 반면에 PSS/OPF를 사용할 때는 현재까지의 프로그램에서는 전압안정도 제약이 목적함수로 제공되지 않기 때문에 다음과 같이 설정하여 적용한다.

표 3.1 bus shunt 제어 설정치

목적함수	모선에 shunt var 부가의 최소화
제어	shunt 부가를 위한 후보 모선과 var 한계치
조건	모선 전압 한계치
	발전기 MW, Mvar 한계치
	전력조류방정식 만족
	변압기, switched shunt 고정(옵션)

var 제어를 위한 모선을 정의하기위하여 Adjustable Bus Shunt 에디터로 shunt susceptance(MVar)를 최대 5000, 최소 -5000으로 설정하고 비용은 편의상 1.0 \$/MVar로 한다.

shunt 보상을 위한 후보 버스들의 shunt 제어는 조정 가능한 총 버스 shunt 성분을 최소화하는 목적함수에 따른다. 이러한 목적함수는 다음식의 선형 penalty를 이용한다.

$$f(B) = \sum_{i=1}^{NVars} |B_i| \cdot C_i$$

$$B_{bind,Maxi} \leq B_i \leq B_{cap,Maxi}$$

여기서:

B = Bus shunt susceptance (p.u.)

$B_{bind,Max}$ = inductive limit (p.u.)

$B_{cap,Max}$ = capacitive limit (p.u.)

C = shunt cost / p.u. Mvar

NVars = 조정가능한 shunt 후보 버스들의 수

비용 C_i 는 per unit Mvar당 cost이고 각각의 조정 가능한 버스 shunt 제어들로 표현된다.

3.1.2 shunt 투입 최소화 결과 고찰

Iter	Mu	NL	Objective	Norm	RHS	Mismatch(pu)	Row	Nearest	Step	NE
1	0	1.64200E+04	1.48E+02	4.75E+00	Peqn26152	Segm+2446	u	1.10E-01		
2	0	1.96957E+02	9.00E+02	4.22E+00	Peqn26153	Qgen29251	u	1.78E-01		
3x	0	2.16482E+02	7.62E+02	3.43E+00	Peqn26153	Qgen26101		1.34E-01		
51x	-4	1.17235E+03	1.27E+02	1.57E-02	Qeqn26201			1.00E+00	1	
52	-4	1.17226E+03	6.29E+01	1.79E-03	Qeqn26202	Qgen26471	u	2.04E-03	3	
53x	-4	1.17234E+03	6.29E+01	1.77E-03	Qeqn26202			1.06E+00	1	
54	-4	1.17234E+03	3.06E+01	2.31E-04	Qeqn26202					

Optimal Solution Found.
Minimum shunt var objective: 1172.336871

앞에서 설명한 바와 같이 설정한 후의 결과는 다음과 같다.

표 3.2 추가된 shunt에 대한 요약

Summary Table for Added Shunt (Mvar):

Bus	Name	Area	Zone	Initial	Final	Change	Minimum	Maximum	Cost	Sensitivity
1595	전력	154	1	6	0.000	-3.663	-3.663	-5000.000	5000.00	100.000
6430	장주	154	5	13	0.000	98.215	98.215	-5000.000	5000.00	100.000
6440	고창	154	5	13	0.000	9.280	9.280	-5000.000	5000.00	100.000
6495	북전주	154	5	13	0.000	65.123	65.123	-5000.000	5000.00	100.000
7890	다령	154	5	13	0.000	40.596	40.596	-5000.000	5000.00	100.000
7380	덕포	154	6	16	0.000	60.091	60.091	-5000.000	5000.00	100.000
7390	북회	154	6	16	0.000	0.116	0.116	-5000.000	5000.00	100.000
10150	삼천포TP	345	9	23	0.000	1929.094	1929.094	-5000.000	5000.00	100.000
10170	유곡	154	1	6	0.000	0.571	0.571	-5000.000	5000.00	100.000
10180	가례	154	9	23	0.000	41.683	41.683	-5000.000	5000.00	100.000
10250	신고성3	345	9	23	0.000	23.123	23.123	-5000.000	5000.00	100.000
10260	신고성2	154	8	22	0.000	96.550	96.550	-5000.000	5000.00	100.000
30156	삼천포#6	22	59	423	0.000	1964.975	1964.975	-5000.000	5000.00	100.000
Total:				0.00	4333.09					

여기서 알 수 있는 바와 같이 초기에 0.0인 모선이 상정사고후 정해진 목적함수를 만족하기 위하여 최종적으로 투입된 shunt의 최소량과 최적의 위치를 나타내고 있다.

3.1.3 감도 해석

변수가 목적함수에 대하여 가지는 영향을 정량화한 것이 감도이며 그 결과는 다음 표와 같다.

표 3.3 유계의 switched shunt와 감도

Bus	Name	Area	Zone	Final	Minimum	Maximum	Sensitivity
1585	모선	154	1	6	60.000	0.000	60.00
1585	북회	154	1	6	30.000	0.000	30.00
1590	북전주	154	1	6	20.000	0.000	20.00
5880	유곡	154	1	6	10.000	0.000	10.00
1575	북전	154	1	6	40.000	0.000	40.00
1595	전력	154	1	6	40.000	0.000	40.00
2500	동서로3	345	2	2	0.000	-180.000	0.00
2510	동서로1	154	2	2	20.000	0.000	20.00
2520	강동	154	2	2	30.000	0.000	30.00
4775	이천	154	2	5	60.000	0.000	60.00
4780	대주	154	2	5	20.000	0.000	20.00
2840	선봉	154	2	2	40.000	0.000	40.00
2720	덕산	154	2	2	40.000	0.000	40.00

유효전력 투입에 따른 감도의 경우, 음의 부호를 가지면서 크기가 큰 감도를 가진 모선들이 부하차단을 위한 좋은 후보이며, 양의 부호를 가지며 크기가 큰 감도는 부하의 증가나 발전기 탈락에 좋은 모선이 된다.

3.1.4 전압 해석

모선의 전압이 0.9pu 보다 더 적은 경우의 모선들은 다음과 같다.

표 3.4 0.9pu 보다 적은 경우의 모선들

Bus	Name	Area	Zone	Final	Minimum	Maximum	Sensitivity
6415	전압MP	154	5	9.7548	1162.24	6420	정교
6430	장주	154	5	0.7322	112.76	6435	부인
6440	고창	154	5	0.7276	112.05	6450	신강제3
6460	신강제2	154	5	0.7409	114.09	6465	북전주
6470	전주	154	5	0.7459	115.02	6495	북전주
6500	서안산#3	345	1	0.8024	276.83	6510	서안산#2
6515	동안산	154	5	0.7928	122.09	6520	합일
6525	고안회력	154	5	0.7926	122.06	6530	영동
6535	고군	154	5	0.7894	121.56	6540	이리
6541	이리6	154	5	0.7804	120.18	6545	팔봉
6575	간성	154	5	0.7592	116.91	6580	내초
6590	서안산	154	5	0.7901	121.68	6770	문진
6815	서천-TJP	154	5	0.8295	127.75	6825	대천
6870	육산	154	5	0.8251	127.06	6875	부여

위와 같은 경우에 이를 해결하기 위하여 OPF bus attribute 에디터를 이용하여 정상 전압 한계치를 최대 1.05pu, 최소 0.95pu로 설정하고 limit 형태는 Hard limit을 선택하여 해를 구하면 다음과 같다.

표 3.5 전압 제약조건을 적용한 후의 결과

Iter	Mu	NL	Objective	Norm	RHS	Mismatch(pu)	Row	Nearest	Step	NE
1	0	1.64209E+04	1.49E+02	4.75E+00	Peqn26152	Segm+2738	u	1.01E-01		
2	0	1.54811E+03	8.92E+02	4.27E+00	Peqn26153	Voll24921	v	7.43E-01		
3	-1	1.60398E+03	5.55E+02	8.01E+00	Qean10150	Qgen30156	v	2.64E-02		

58	-4	4.39958E+03	2.74E+03	5.85E-05	Qean	6495	Cap	6495	1.69E-01	2
59	-4	4.39960E+03	2.35E+03	1.16E-04	Qean	6495	Cap	7890	6.49E-02	2
60	-4	4.39960E+03	2.14E+03	1.05E-04	Qean	6495			1.00E+00	1
61	-4	4.39957E+03	1.02E+03	1.27E-05	Qean	6580				

Optimal Solution Found.
Minimum shunt var objective: 4399.571926
BUSES WITH VOLTAGE LESS THAN 0.9000:
X----- BUS -----X AREA V(PU) V(KV) X----- BUS -----X AREA V(PU) V(KV)
* NONE *

결과적으로 0.95pu 이하인 전압의 보상을 위하여 모선에 투입된 shunt 양은 3227Mvar 정도가 된다. P-V법을 대신하여 분석할 수 있는 방법도 몇가지만을 제외하고 기본적으로 Q-V 분석법과 동일하다. 다음은 이러한 설정을 나타낸 것이다.

목적함수	부하조정의 최소/최대화
제어	부하조정을 위한 후보 모선 부하
조건	모선 전압 한계치 발전기 MW, Mvar 한계치 전력조류방정식 만족 변압기, switched shunt 고정(옵션)

Adjustable Bus load 에디터로 부하를 정의하고, bus table 에디터로 부하 승수의 초기치를 1.0, 최대치를 1.0, 최소치를 0.1로 설정하고 비용은 10.0 \$/MW로 하는 모선부하 table을 작성하여 해를 구한다.

이상에서처럼 가혹한 상정사고에서 시간이 많이 소요되는 기존의 Q-V법, P-V법 분석을 PSS/OPF에서 목적함수와 전압제약조건 등으로 손쉽게 분석할 수 있는 방법을 알아보았다.

4. 결 론

국내에서 진행중인 전력산업의 구조개편후, 전력시장운영 체제하에서는 전력시스템의 안전도 확보가 중요함은 이미 언급하였다. 향후 계통의 혼잡관리와 더불어 에너지와 예비력의 최적화 등 그 중요성이 점차적으로 커질 것으로 판단되며, 현재 최적조류계산 프로그램의 개발이 국내에서 진행되고 있으며, 향후에도 국내 기술로 프로그램 개발이 활성화 될 것으로 보인다. 이러한 상황에서 개발된 프로그램의 검증이 필요하고, 현재 일반화된 PSS/E 조류계산 데이터를 그대로 사용할 수 있는 PSS/OPF 프로그램 소개와 더불어 국내 실계통을 대상으로 하여 전압불안정/붕괴를 분석하는 방법을 보였다. 취약한 전압조건들에 대한 상정사고의 연구와 이를 극복하기 위하여 제어와 설정을 결정하였으며 또한 가장 임계점의 요소들에 대한 유용한 정보를 얻었다. 목적함수로는 모선 shunt var의 투입 최소화, 모선 부하 조정 최소화 등을 사용하여 전압 불안정을 분석하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] PTI, "PSS/OPF - Optimal Power Flow", manual, 1999
- [2] Ebrahim Vaahedi 외 4명, "Large Scale Voltage Stability Constrained Optimal VAR Planning and Voltage Stability Application Using Existing OPF/Optimal VAR Planning Tools", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14, No.1, 1999
- [3] Deb Chattopadhyay 외 1명, "Dispatch Optimization Incorporating Transient and Voltage Stability Constraints", IEEE, 2000
- [4] Ebrahim Vaahedi 외 1명, "Considerations in Applying Optimal Power Flow to Power System Operation", IEEE, 1989
- [5] 한국전기연구소, "EMS 기능 고도화 연구", 과학기술부, 2000. 8.