

전압안정도 여유를 고려한 최적조류계산에 관한 연구

김상임\* 정민화\* 이병준\* 송길영\* 남궁재용\*\* 최홍관\*\* 문영현\*\*  
\*고려대학교 전기공학과 \*\*한국전기연구소

Study on Optimal Power Flow Considering Voltage Stability Margin

S. Kim\* M.H. Jeong\* B. Lee\* K.Y. Song\* J. Namgoong\*\* H. Choi\*\* Y.H. Moon\*\*  
\*Korea University \*\*KERI

**Abstract** - In this paper the concept of voltage stability operating limit in optimal power flow problem is described. A methodology of optimal power flow considering voltage stability margin is proposed based on auxiliary constraint to get a secure dispatch solution. The look-ahead margin is used to shift dispatch solutions to the secure direction in proposed framework. The algorithm proposed is successfully tested on IEEE 30-bus system.

1. 서 론

계통의 운전제약을 고려하는 경제부하배분 문제는 전계 발전비용의 최소화라는 목적함수를 사용하는 최적조류계산(optimal power flow:OPF)의 해를 구하는 문제로 정식화된다. 이 문제의 해는 모든 계통 제약들을 만족하면서 목적함수인 각 화력발전기의 연료비의 합을 최소화하는 발전력 배분을 의미한다. 최적조류계산의 해를 구하고 계통운영에 반영하려는 노력은 수많은 연구자들이 지대한 관심을 가지고 노력해 온 연구분야이다<sup>(1)(2)</sup>

최근 전력산업은 경제적, 사회적 그리고 기술적으로 급속한 환경변화를 겪고 있다. 앞으로 진행될 전력산업의 구조개편 방향을 정확하게 예측하기는 어렵지만 극단적으로 표현하자면 현존하는 계통요소들을 가급적 더 이상의 투자없이 최대한 활용하는 방향으로 가고 있다고 할 수 있다. 이러한 환경에서 기존의 유효전력 또는 무효전력 공급자원 및 전력수송망을 이용한 안전하고 신뢰성있는 전력공급 및 계통운영은 과거 어느 때보다 어려운 일이 되고 있다. 지금까지는 신뢰성있는 공급능력의 확보라는 측면에서 발전소 및 송전망의 건설이 지상과제였지만 이제는 기건설된 계통을 경제적이면서 안전하게 운영하기 위한 운영문제가 중요한 이슈로 되고 있다고 할 수 있다. 이에 따라 다양한 계통운영상의 제약조건을 고려한 OPF를 이용하여 최적의 계통운영을 수행하는 방안에 대한 연구가 과거 어느 때보다 더욱 필요한 시점에 와있다고 할 수 있다.

OPF문제에 포함되는 계통운전 제약들에는 위에서 언급한 바와 같이 계통의 공급능력에 대한 물리적인 제약들 이외에 안전성 측면에서 고려되어야 하는 제약들도 포함되어야 한다. 특히 안전성 측면에서 전압안정도 문제는 지금까지는 건전상태에서 나타나는 일이 거의 없었고, 일반적으로 경제부하배분과 같은 초단기 운영계획의 성격상 이에 대한 고려가 어려우므로 별도의 해석을 통해 계통운영에 반영하여 왔다. 그러나 앞서 언급한 바와 같은 환경변화를 고려할 때 단기운영문제에 있어서도 전압안정도와 같은 안전성 문제가 OPF의 제약으로 포함되어야 할 가능성이 많아지고 있다. 최근 전력계통은 발전비용이 싼 대형발전기들이 집중되어 있는 발전지역과 대도시 부하집중지역이 지리적으로 분리되어 장거리 송전선로로 연결된 구성을 보이고 있다. 이러한 경우 경제

부하배분의 해는 장거리 연계선로의 조류증가 및 무효전력 손실로 인해 중부하시에 심각한 사고 등에 의해 전압 불안정 현상이 계통의 붕괴로 이어질 가능성을 보이고 있는 만큼 다른 어떤 제약보다도 전압안정도를 고려한 운용한계제약에 대한 관심은 높아지고 있다고 할 수 있다.<sup>(3)</sup>

이와 관련된 유사한 연구논문들을 살펴보면 참고문헌 [4]에서 전압안정도 운영한계를 제약으로 하는 OPF를 이용한 계통신뢰도 산정방안을 제안하였고, [5]에서는 전압안정도 여유를 향상시키기 위한 계통제어량의 최적화 방안을 제안하였다. 전자의 경우 수많은 운전점에 대한 전압안정도 운영한계를 구해놓고 OPF에 선형제약으로 추가하였다. 그러나 이 방법은 운용한계를 구하기 위한 방대한 양의 선형계산이 요구되고 선형계산을 행한다는 문제가 있다. 후자의 경우 전압안정도 여유를 OPF의 제약에 고려하고 있지만 그 목적을 예방제어 및 긴급제어를 위한 계통요소요소의 제어량의 최소화에 그 초점을 맞추고 있다. 본 연구에서는 OPF를 이용한 최적의 발전력 배분을 구하는 문제에 look-ahead margin<sup>(6)</sup>을 이용한 전압안정도 여유제약을 고려하는 방안을 제안하고 전압제어모션의 전압하한치 조정을 이용한 안전성을 향상하는 최적해를 구하는 과정을 보이고자 한다. 제안하는 알고리즘을 IEEE 30모션 시험계통에 적용하여 그 유용성을 검증한다.

2. 전압안정도 여유를 고려한 최적조류계산의 개념

OPF는 복합계통에서 최적의 정적인 계통상태를 결정하도록 운전 제약을 만족시키면서 목적함수를 최소화하는 해를 구하는 최적화문제이다. 따라서 OPF는 비선형 최적화 문제이며 수학적으로는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{목적함수 } \min \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (1)$$

$$\text{제약조건 } g(x) = 0 \quad (2)$$

$$h_{\min} \leq h(x) \leq h_{\max} \quad (3)$$

식 (1)의 목적함수는 경제급전을 위한 총발전비용의 최소화이고 식 (2)는 등호제약식, 식(3)은 부등호제약식을 의미한다. 따라서 등호제약식은 계통의 유효 및 무효 조류방정식이고 부등호제약식은 다음과 같은 물리량의 제약들이다.

- 도선전압
- 선로조류
- 발전기의 유효전력 출력
- 발전기의 무효전력 출력
- 변압기 탭 및 무효전력 보상기 등

OPF문제에 전압안정도 여유제약을 고려하기 위해서는 근본적으로 위와 같은 정식화의 식 (3) 부등호 제약식에 포함될 수 있도록 전압안정도 여유에 대한 완전한

수학적 표현을 해야 한다. 즉 최적화 실행가능영역을 구성하는 다른 제약들과 동일하게 취급되어 정식화되어야 할 것이다. 그러나 아직까지는 그 수학적 표현이 용이하지 않고 앞서 언급한 바와 같이 중부하시에 발생하는 심각한 계통사고 이외에는 severe한 제약으로 나타날 가능성이 적으므로 본 논문에서는 건전상태에서의 OPF 해에 대해 모든 상정사고에 대해서 안전한 전압안정도 여유를 운용한계로 제한함으로써 경제성을 약간 희생하더라도 전압안정도 안전성 측면에서 보다 안전한 최적해를 도출하는 방안을 제안한다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 적용을 위한 전제조건을 설명하면 다음과 같다.

- 중부하
- 대체로 발전기 집중지역과 부하 집중지역으로 구분된다.
- 경제부하배분에 의해 최적화된 발전기 출력배분은 severe한 계통사고시 계통안정도에 심각한 문제를 일으킬 가능성이 크다. 즉, 경제성에 기반해 결정된 건전상태의 운전점은 전압안정도 한계점과의 여유가 너무 작아 계통 안전성(security)에 취약해질 수 있다.
- 조상설비는 더 이상의 투입이 불가능하다.
- 따라서 계통의 안전성 향상을 위한 제어수단은 발전기의 유효전력 출력의 조정이 유일한 수단이다.

물론 중부하시 전압보상문제는 최적으로 계획된 조상설비의 투입으로 대비하고 있지만 중부하상태에서 심각한 계통사고가 발생해도 조상설비의 조정은 한계에 있다고 가정할 수 있다.

제안하는 알고리즘을 그림1에서 순서도로 정리하였다. 먼저 건전상태에서 중부하(연중 최대부하)를 상정하여 OPF를 수행한다. OPF의 해인 가장 경제적인 발전력 배분상태에서의 전압안정도 한계점과의 여유를 구하기 위해 발전량과 부하수준을 일정량(예:5%)만큼 증가시킨 후 look-ahead margin을 계산한다. Look-ahead margin은 2개의 조류해만으로 비교적 정확히 전압안정도 한계점을 추정하는 방법이다. 이에 대해서는 다음 절에 자세히 설명하기로 한다. 이 때 구해진 전압안정도 한계점과의 여유가 너무 작으면 이 해는 severe한 계통사고가 발생했을 때 전압불안정 현상을 보일 가능성이 매우 높다. 물론 이 상태에서 부하지역의 전압분포 역시 낮게 형성되어 있을 것이다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 소위 SCOPF(security constraint OPF)가 아니므로 건전상태에서 전압안정도 여유를 기준값이상으로 충분히 가져가는 방법을 고려해 볼 수 있다. 이를 위해 부하지역 모선 중 전압제어모선(pilot point)으로 지정하여 모선전압제약의 하한치를 조금 상향조정하면 다시 OPF를 수행한다. 전압제어모선의 위치선정은 안전성의 향상에 큰 영향을 미칠 것이다. 조정된 제약을 가지고 다시 OPF를 수행한다. 이 때 얻은 해는 전압제어모선의 전압을 향상시키기 위해 어느 정도 경제성이 희생된 발전력 배분을 보이지만 전압분포면에서 좋은 결과일 것이 예상된다. 이 때 다시 안정도 한계점과의 여유를 구하여 식 (4)를 만족하면 전체 알고리즘이 종료되고 그렇지 않으면 다시 전압제약을 상향조정해가며 식 (4)를 만족하는 최적해가 얻어질 때까지 위의 과정을 반복한다.

$$\text{Look-ahead margin} > M_{\min} \quad (4)$$

식 (4)의  $M_{\min}$ 는 미리 구해진 안전성 제약으로서 모든 상정사고에서 전압안정도를 보장하는 최소한의 전압안정도 운용한계이다.

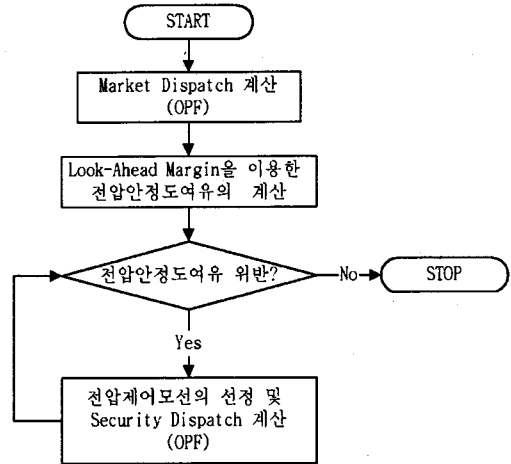


그림 1. 전압안정도 여유를 고려한 최적조류계산

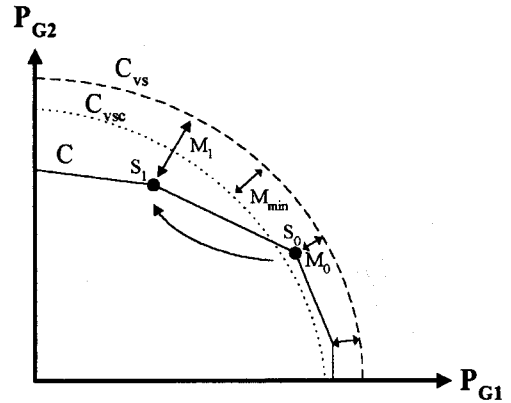


그림 2. 전압안정도 운용한계의 개념

제안하는 알고리즘에 해를 찾아가는 과정을 쉽게 보이기 위해 2대의 발전기만을 제어변수로 갖는 간단한 문제의 예를 들어본다. 그림 2와 같은 계통 파라미터 평면에서 본 알고리즘에서 구해지는 해의 후보들은 궤적 C 상의 수많은 점들이다. 즉 궤적 C는 제약을 포함하는 실행가능 영역을 의미한다. 궤적  $C_{vs}$ 는 모든 해의 후보들에 실제 전압안정도 한계점의 집합이고  $C_{vsc}$ 는 가장 심각한 상정사고에서의 전압안정도 한계점들의 집합이다. 알고리즘의 첫 번째 OPF의 해인 경제적 출력배분이  $S_0$ 점이라고 하면, 이 점에서의 전압안정도 한계점과의 여유  $M_0$ 는 너무 작아서 중대한 계통사고가 발생할 경우 이미 전압안정도 한계인  $C_{vsc}$ 를 벗어나서 전압불안정 현상을 보이고 있다. 따라서 이 해를 운전가능한 제약범위로 가져야 한다. 이를 위해 지정된 전압제어모선의 전압하한을 조금 상향 조정하여 다시 OPF를 수행하여 구해진 해가  $S_1$ 이라면 이 해는 경제성을 약간 희생하더라도 식 (4)를 만족하는 최적해(security dispatch)가 된다. 제안하는 알고리즘에서는 안전성을 보장하기 위한 방향을 전압제어모선의 전압하한치가 결정하고 있지만 계통손실, 연계선 조류량의 한계 등 다양한 제어수단이 있음을 밝혀둔다. 그리고 OPF 정식화내부에 전압안정도 여유 제약을 포함하는 연구가 진행 중에 있다.

### 3 전압안정도 여유의 계산

#### 3.1 전압안정도 여유의 개념

일반적으로 계통의 전압안정도 해석은 Maximum System Loadability 측면에서 이루어져 왔다. 가장 잘 알려진 해법으로 연속조류계산과 최적화를 이용한 해법을 들 수 있다<sup>(7)(8)</sup>. 전자는 잘 알려져 있듯이 현재 계통상태 즉, 초기부하와 초기발전량을 일정한 비율로 조금씩 증가시키면서 조류해가 존재하지 않게 되는 평형해를 찾아가는 방법이고, 후자는 앞서 언급한 평형해를 표현하는 계통파라미터를 찾기 위해 최적화 방법을 이용하는 것이다. 다시 말하면 전자는 "고정된 방향의 탐색 (fixed direction)", 후자는 "최적화에 의한 해의 직접 계산(direct method)"이라고 할 수 있다. 최근들어 후자와 같은 형태의 문제를 풀기 위한 최적화 방법에 대한 연구가 내점법(Interior Point Method)을 중심으로 매우 활성화 되어 있다.

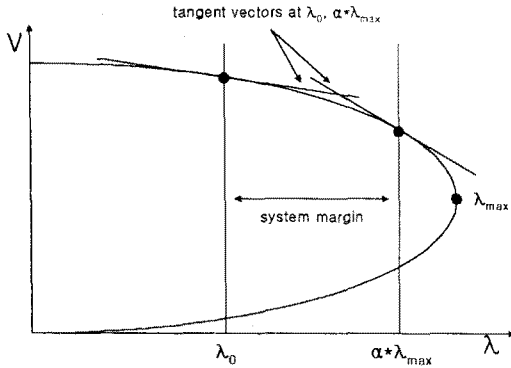


그림 3. 전압안정도 여유지수의 개념도

전압안정도 해석의 궁극적인 목적은 계통이 한계점 근처에 이르지 않도록 하게 하는 지수를 산정하는데 있다. 따라서 정확한 한계점의 계산에 앞서 임의의 운전점에서 계통 변화에 대한 전압안정도 한계점과의 여유를 찾는 작업이 선행되어야 한다. 그림 1에 이를 위해 기준에 많이 사용되어온 지수들을 도식화하고 있다.

①  $\alpha \lambda_{max}$

-  $\lambda$ : 계통파라미터,  $\alpha$ 는 계산의 불확실성이나 여유 등을 고려하여 1보다 작은 수로 책정하는 것이 바람직하다.

② Voltage Stability Indices (위의 그림에서는 TVI를 예로 보였다.)

$$TVI_i = \left| \frac{dV_i}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (5)$$

③ MW Margin

- ①항의 지수인 계통파라미터  $\lambda$ 를 계통운영자가 직관적으로 이해할 수 있도록 실제적인 단위로 표현할 필요가 있다.

#### 3.2 Look-ahead margin에 의한 전압안정도 여유의 추정

전압안정도 한계점과의 여유는 look-ahead margin을 이용한다<sup>(6)</sup>. look-ahead margin은 원래 대규모계통에서 다수의 상정사고에 대해 전압안정도 해석상의 상정사고 ranking을 매기기 위해 제안되었다. 계통파라미터( $\lambda$ )의 변화에 대한 전압변화를 도시하면 그림 1과 같이 nose곡선을 이루고 그 꼭지점은 saddle-node 분

기점으로서 정적인 전압붕괴점으로 알려져 있다. 계통이 전압안정도 한계점 근처에 있으면 이론적으로 nose곡선은 거의 식 (6)과 같은 2차방정식을 만족하는 곡선이 된다. 이 사실을 이용하면 nose곡선의 꼭지점까지 여러 번의 조류계산과정없이 단 2개의 조류해를 가지고 비교적 정확한 전압안정도 한계점을 추정할 수 있다. 만일  $i$ -번째 모선이 전압안정도면에서 가장 취약한 모선이라면 다음과 같은 식들을 만족한다.

$$\lambda = a + bV_i + cV_i^2 \quad (6)$$

$$\lambda_1 = a + bV_{i,0} + cV_{i,0}^2 \quad (7)$$

$$\lambda_2 = a + bV_{i,1} + cV_{i,1}^2 \quad (8)$$

$$1 = b \frac{\partial V_{i,1}}{\partial \lambda_1} \frac{\partial V_{i,1}}{\partial V_{i,1}} + c \frac{\partial V_{i,1}}{\partial \lambda_1} \frac{\partial V_{i,1}^2}{\partial V_{i,1}} \quad (9)$$

$$= b \frac{\partial V_{i,1}}{\partial \lambda_1} + 2c \frac{\partial V_{i,1}}{\partial \lambda_1} V_{i,1}$$

$$\lambda_{max} = a - \frac{b^2}{4c} \quad (10)$$

계통파라미터가 초기점  $\lambda_0$ 에서 그 다음 평형해  $\lambda_1$ 로 변화할 때 각 운전점에서의 모선전압  $V_{i,0}$ ,  $V_{i,1}$ 는 식 (6)의 2차방정식과 이를  $\lambda$ 에 대해 미분한 식 (9)을 만족해야 하므로 식 (7)~(8)과 같이 된다. 따라서 역으로 연립방정식을 풀면 2차식의 계수  $a, b, c$ 와 꼭지점인  $\lambda_{max}$ 를 구할 수 있고 이를 이용하면 전압안정도 한계점과의 여유인 look-ahead margin을 얻을 수 있다. 따라서 look-ahead margin을 제안하는 알고리즘의 전압안정도 여유제약에 이용하면 알고리즘의 수행과정에서 얻을 수 있는 최소한의 정보만을 가지고도 OPF의 해가 얼마나 전압안정도 한계점과의 여유를 가지고 있는지를 신속하게 판단할 수 있게 된다. 다음 절에서 사례연구를 통해 이를 활용하여 IEEE 시험계통에 대해 전압안정성을 고려한 최적운전방안을 구하는 과정을 설명한다.

### 4. 사례연구

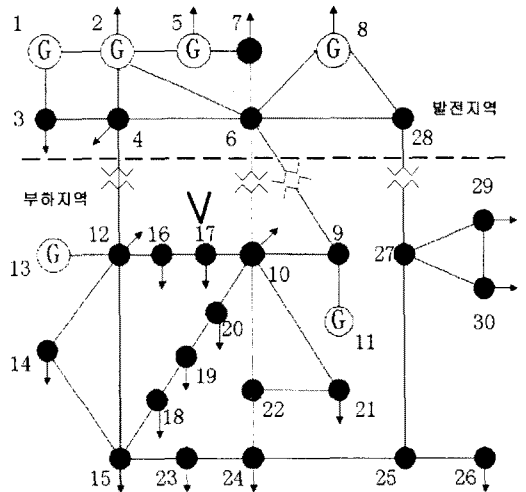


그림 4 IEEE 30모선 시험계통

IEEE 6-발전기 30-모선 시험계통에 제안하는 알고리즘을 적용하여 그 유용성을 검증하였다. 각 발전기의 출력상한과 중별 연료비 계수는 표 1과 같다. 중부하를 가정하기 위하여 초기부하 및 발전량의 크기에 1.5 배를 하고 연료비계수는 해석의 편의를 위하여 2차의

표 1. 발전기 데이터

모선#	$P_{Gi}^{max}$	$P_{Gi}^{min}$	연료비계수		
			ai	bi	ci
1	300	50	0	3.0	0
2	120	20	0	2.0	0
5	75	15	0	1.5	0
8	52	10	0	5.0	0
11	45	10	0	6.0	0
13	60	10	0	6.0	0

연료비함수의 1차항의 계수만으로 적정값을 상정하였다. 시험계통은 그림4와 표1에서 알 수 있듯이 부하모선들이 집중되어 있는 아래쪽의 부하지역과 발전비용이 싼 발전기들이 모여있는 위쪽의 발전지역으로 구분되고 그 사이에 비교적 장거리선로로서 조류량이 큰 네 개의 연계선로가 있는 특징을 가지고 있다.

이 계통에 대해서 OPF를 수행하면 표 2의 첫 번째 열과 같은 결과를 얻는다. 이 때 출력 배분을 살펴보면 발전단가가 싸고 용량이 큰 2, 5번 발전기는 최대로 출력을 내고 비싸고 작은 11, 13번 발전기가 최저로 출력을 내고 있다. 결국 1번 발전기는 운전계획에 반영된 발전기 가운데 제시 가격이 가장 비싼 발전기로서 계통한계가격(system marginal price: SMP)을 결정한다. 해당기간 중에 이 발전기의 출력은 발전기 가능출력의 상한치와 하한치 사이에 있으면서 계통수요의 변동분을 흡수하게 되는 것이다.

그러나 이러한 출력배분은 모선전압들이 매우 낮은 분포를 보이고 있을 뿐 아니라 이 때 계산된 전압안정도 여유가 기준값-여기서는 35%로 상정하였다.-보다 낮으므로 이 해는 알고리즘의 최적해가 아니다. 따라서 이러한 출력배분으로는 안전성명에서 계통운전을 할 수 없으므로 이를 조정하기 위하여 전기적으로 부하중심점 근처에 있는 17번 모선을 전압제어모선으로 지정하고 17번 모선의 전압운전 하한값을 단계적으로 상향조정하면서 전압안정도 한계점과의 여유를 계산해가며 원하는 여유를 갖는 출력배분을 결정하였다. 표 2의 둘째 열부터 다섯 째 열까지 각각 17번 모선의 전압제한을 0.9500, 0.9600, 0.9700, 0.9800으로 하였을 때의 OPF결과를 보여주고 있다. 이 중 17번 모선의 전압값을 0.9800이상으로 하였을 때 전압안정도 여유제약을 만족하므로 이 때의 출력배분이 최적해가 되고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 살펴보면 전체발전비용은 증가하고 전력손실은 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 17번 모선전압을 하한치로 유지하기 위해 원래의 출력배분이 조정되었음을 의미하는데 17번 모선과 전기적으로 가깝지만 비싼 발전기들의 출력이 증가하는 반면 멀리 떨어져 있지만 싼 발전기들의 출력이 감소하고 있다. 이는 안전성을 위해 경제성을 희생하는 발전력 재조정이 불가피했음을 의미한다. 즉 전압을 유지하기 위하여 발전기의 유효전력출력이 변화하는 것은 각 모선의 무효전력 공급원이 이미 최대로 투입되어 계통의 제어요소가 발전기의 유효전력출력이 거의 유일했기 때문이다. 그림 4에 보이는 연계선로인 L4-12, L6-10, L6-9, L28-27의 조류량의 합계도 줄어든다고 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 전력손실이나 연계선 조류한계를 이용하여도 이번 사례연구와 유사한 결과를 얻을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 경제급전을 목적으로 갖는 최적조류계산문제에 전압안정도 운영한계를 고려하여 건전상태에서 결정된 최적해가 심각한 상정사고에 대해서도 안전하면

표 2. 발전비용, 손실, 전압안정도 여유, 연계조류

	Market Dispatch	Security Dispatch			
		0.9500	0.9600	0.9700	0.9800
모선전압 (V <sub>17</sub> )	0.9430	0.9500	0.9600	0.9700	0.9800
전체발전비용	1187.9	1214.8	1312.8	1379.5	1478.6
송전손실 [MW]	21.7	19.2	13.6	11.2	9.1
$\lambda_{max}$	0.6991	0.8622	0.9658	1.0608	1.1783
Look-ahead $\lambda_{max}$	0.6534	0.8058	0.9027	0.9915	1.1013
MW여유 (%)	91.9 (21.9)	114.2 (26.8)	127.9 (30.1)	140.5 (33.0)	156.0 (36.7)
연계선로조류 [MW]	140.5	140.4	118.3	93.7	58.9

서 경제적인 발전기의 출력배분을 결정하는 방안을 제안하였다. 그 한 방안으로서 OPF에 의한 경제부하배분해에 대해 look-ahead margin을 고려하여 경제성을 심각하게 잃지 않으면서 전압안정도 한계점에 대해 일정한 여유를 가지도록 급전패턴을 재배분하는 알고리즘을 설명하였다. 그 결과 경제성을 약간 희생하더라도 안전성 측면에서 안전한 최적해를 구할 수 있었다. 사례연구에서는 모델계통에서 제안하는 알고리즘의 최적해를 구하는 과정을 보이기 위해 임의의 부하모선전압에 대한 OPF 하한제약을 상향조정함으로써 발전기의 출력배분이 재조정되도록 하여 전압안정도 면에서 안전한 최적해를 구하는 과정을 보였다. 현재 OPF 정식화내에 수학적으로 표현가능한 전압안정도 여유제약을 추가하여 한번의 최적화 실행으로 전압안정도 측면에서의 안전성을 보장하는 해를 구하는 방법이 개발 중에 있다. 이번 연구에서는 이에 대한 개념을 보이기 위한 설명과 실행가능성 타진을 위한 사례연구가 주였음을 밝혀둔다.

(참 고 문 헌)

- [1] H.W.Dommel, W.F.Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Trans. on PAS, Vol. 87, pp. 1866-1876, 1968
- [2] D.I.Sun, et. al, "Optimal Power Flow by Newton Approach", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 10, pp 2864-2880, October 1984
- [3] 김승기, 송화창, 이병준, 권세혁, "연속알고리즘을 이용한 연계선로의 송전용량결정", 대한전기학회 논문지 제 49권 제2호, 2000년 2월, pp.78-84
- [4] W.Li, Y.Mansour, et. al, "Incorporation of Voltage Stability Operating Limits In Composite System Adequacy Assessment : BC Hydro's Experience", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 4, November 1998
- [5] X. Wang, G.C.Ejebe, et. al, "Preventive/Corrective Control for Voltage Stability Using Direct Interior Point Method", PE-179WRS-16-01-1997
- [6] H.D.Chiang, et. al, "Look-ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Function for Large-Scale Power Systems", IEEE Trans. on Power Systeys, Vol. 12, No. 1, pp. 173-180, February 1997
- [7] 송화창, 이병준, 권세혁, "실용적인 스텝키 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발", 대한전기학회 논문지 제48권 제3호, 1999년 3월, pp.190-196
- [8] G.D.Irisarri, X.Wang, "Maximum Loadability of Power Systems using Interior Point Non-Linear Optimization Method", 96 WM 207-1 PWRS