

## 시변민감도를 이용한 안전도제약 최적조류계산의 On-Line 적용 알고리즘

김발호 · 신영균

홍익대학교 전기공학과

E-mail : alijin@hanmail.net

### The On-Line Application Algorithm of SCOPF Using Time-varying Sensitivities

Balho Kim and Young Kyun Shin

Hongik University

#### 요 약

규제완화된 경쟁적 전력시장으로의 이행은 전력시스템의 운영 및 계획에 있어서 기존의 중앙급전방식과는 다른 새로운 개념을 필요로 하고 있다. 경쟁적 전력시장에서의 전력계통 운영은 경제적 측면을 충분히 고려하여 보다 적은 여유로 운영될 것으로 예상된다. 따라서 SCOPF(Security Constrained Optimal Power Flow)의 역할이 커지면서 실시간 안전도 처리에 대한 중요성이 보다 부각되고 있다. 본 논문은 On-Line 상의 적용을 가능하게 하는 SCOPF의 응용을 다룬다. 전력계통의 안전도 여유는 계통의 조건과 부하상황에 따라 시시각각 변화한다. 따라서 안전도 처리를 위한 민감도 계수 역시 전력계통 상태에 따라 재계산되고 적용 시에 갱신 처리되어야 한다. 본 논문의 목적은 안전도 처리를 위한 민감도 계수의 효율적인 사용을 통해 적정 안전도를 확보하여 이 알고리즘을 계통운영상에 실시간으로 적용 가능토록 하기 위함이다. 사례연구에서는 제안된 메커니즘을 간단한 예제계통에 적용하여, 상정사고에 대한 보다 안정적인 결과가 나타남을 보였다.

**Abstract** — The recent movement to deregulated and competitive electricity market requires new concepts against existing central dispatch in the system operation and planning. As power systems tend to be operated more closely to their ultimate ratings, the role of SCOPF (Security Constrained Optimal Power Flow) is changed and the importance for real-time security enhancement will be more increased in the new and competitive electricity market. This paper deals with the application of the SCOPF which makes possible the On-Line application. The security margin of power system truly is changed according to the conditions or configuration of power systems, therefore, the sensitivity factor related to the security is recalculated and the application should be updated in accordance with the state of power system. The goal of this paper is to obtain proper security through the efficient usage of the sensitivity and to apply this algorithm to system operation. The proposed mechanism has been tested on a sample system and the results show more secure conditions against critical contingencies.

#### 1. 서 론

전력산업에 있어서의 최근의 움직임은 기존 수직독점 체제하에서의 단일회사에 의한 단일 계통으로 운용되던 전력사업체제로부터 다수의 시장참여자에 의해 각자의 이익 극대화를 추구하는 규제완화된 경쟁적 전력시장의 전환으로 요약될 수 있다. 이에 따라 비용최소화라는 중

앙집중적 급전계획의 수정이 불가피 해지고, 계통운영에 있어서 효율성을 극대화하기 위한 방안이 당면과제로 부각됨에 따라 이에 따른 새로운 요구 사항에 관심을 기울여야 한다<sup>1)</sup>.

오늘날, 컴퓨터 및 정보통신 기술의 발달에 힘입어 최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)은 기존의 제한적인 범위를 벗어나 실질적인 계통운영의 수단으로서 그

활용영역을 확장시키고 있으며, 계통운용의 효율성 확보, 합리적인 요율체계의 확립과 같은 문제들과 맞물려 그 필요성이 어느 때보다도 강조되고 있다.

계통의 운전에 있어서, 경제성과 더불어 최우선적으로 고려되어야 할 요소는 계통을 안정적으로 운용하는 것, 즉 적정 수준의 계통안전도(System Security)를 유지하는 것이다. 즉, SCOPF(Security Constrained OPF)는 보다 경제적인 계통운용과 복잡한 전력거래가 이루어질 것으로 예상되는 구조개편 이후 계통운용 측면이나 요율산정 측면에서 크게 부각되는 이슈중의 하나이며, 경쟁적 전력시장의 운용을 위한 핵심기법으로 활용될 수 있을 것이다<sup>[2]</sup>.

본 연구에서는 SCOPF의 실시간 적용(On-Line)을 가능하게 하는 메커니즘을 제안하고, 실질적인 계통운용의 수단으로서 활용하기 위한 일환으로 시시각각 변화하는 계통상황에 응동하는 민감도(Sensitivity Factor)를 적용함으로써 정확한 안전도를 확보하는 데 그 목적이 있으며, 모의계통을 통해 활용상의 타당성을 검증하였다.

## 2. 안전도제약 최적조류계산(SCOPF)

### 2-1. SCOPF의 정식화와 특징

SCOPF란 상정사고를 고려한 혹은 상정사고제약조건을 갖는 최적조류계산(OPF)으로서, 단일 상정사고(single outage)에서도 전력계통에서의 여러 가지 운전제약을 만족하는 최적의 운전점을 찾는 과정을 말한다. 결국, 안전도란 계통설비(발전설비 및 송배전설비)의 일부가 돌발적인 사고로 인하여 계통으로부터 이탈되더라도 적정 조건을 만족하면서 계속 안정적으로 운전될 수 있는 정도를 의미하는 것으로서 안전도제약은 다음과 같은 두 가지 형태를 갖는다.

- 사고를 고려하지 않는 안전도제약(N-0 안전도제약) : 일반적으로 선로조류, 전압크기와 무효전력이 원래 계통에서의 허용범위 내에 있어야 함.
- 단일 사고 안전도제약(N-1 안전도제약) : 단일의 계통요소 사고의 결과로서 나타나는 어떤 상태에서도 이전의 변수들이 허용범위 내에서 만족되어야 함<sup>[3]</sup>.

상정사고를 고려하지 않는 OPF계산은 N-0 안전도제약을 만족하는 운전점을 찾으려는 것이다. 이로부터 얻은 운전점으로부터 N-1 안전도제약을 찾기 위해 안전도 해석(Security Analysis)이 이루어지며, SCOPF를 수행하기 위해서는 N-1 안전도제약이 OPF 정식화 과정에 포함되어야 한다.

SCOPF는 최적화의 결과로서 다양한 상정사고 후 전력조류가 안전도제약을 위배하지 않도록 한다. 여기서 고

장 후란 계통운용에 따른 새로운 운전점이 결정된 이후 계통의 정상상태 상황을 의미한다. 결국, 부하의 변동에 따라 계통의 정상상태 특성에 해당하는 고장 후 다양한 전력조류상태가 존재하게 된다<sup>[4]</sup>.

$E=(P, Q, V, \Theta)$ 라는 벡터를 정의하면, OPF의 목적함수 및 제약조건은 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & F(E) & (1) \\ \text{s.t.} \quad & G(E)=0 & (2) \\ & P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & (3) \\ & Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} & (4) \\ & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} & (5) \\ & |f_l| \leq TC_l^{\max} & (6) \end{aligned}$$

- $G_i$  : Generator bus index
- $i$  : bus index
- $l$  : line index
- $F(E)$  : 발전비용함수
- $G(E)$  : 전력조류방정식
- $P_{Gi}, Q_{Gi}$  : 모선별 유효전력 및 무효전력
- $f_l, TC_l^{\max}$  : 선로별 조류량 및 해당선로용량

등식제약식(식 (2))은 각 모선에서의 유효/무효전력 균형을 위한 전력조류방정식을 의미하며, 부등식 제약식으로는 발전기모선의 유효/무효 전력에 대한 출력제약(식 (3)(4))과 각 모선의 전압 상, 하한치(식 (5)) 및 선로용량 제약조건(식 (6))을 비롯한 운전상의 제약조건을 포함한다.

이 때, N-1 안전도제약(security constraints)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} G(E^s) &= 0 & (7) \\ Q_{Gi}^{\min} &\leq Q_{Gi} + \Delta Q_{Gi}^s \leq Q_{Gi}^{\max} & (8) \\ V_i^{\min} &\leq V_i + \Delta V_i^s \leq V_i^{\max} & (9) \\ |f_l + \Delta f_l^s| &\leq TC_l^{\max} & (10) \end{aligned}$$

여기서,  $\Delta \square$ 는 상정사고에 따른 변동분을 의미한다. 그러나 본 연구에서는 무효전력은 충분히 확보되어 있으며, 전압의 변동은 충분히 수용가능하다는 가정 하에 선로의 열용량제약에만 초점을 맞추기로 한다.

### 2-2. 안전도(Security)의 확보

계통운전에 있어 경제성보다도 우선적으로 고려되어야 할 것이 적정 계통안전도(System Security)를 유지하는 일로서, 이는 계통신뢰도(Reliability) 및 계통안정도(Stability)와 밀접한 관련이 있다<sup>[2]</sup>.

대부분의 전력계통은 상시운전감시(monitoring) 체계를 갖추고 있으며, 일정 선로예비력을 가지면서 신뢰성

있는 방식으로 운전되고 있다. 그러나 계통의 일부고장(상정사고)으로 인하여 선로조류가 선로용량을 초과하여 흐를 수 있으며, 이와 같은 상황에서는 선로의 연쇄적 붕괴를 가져올 수 있다. 따라서 돌발적인 사고의 경우 발생하는 선로용량 초과분을 사전에 할당하여 운전되도록 상정사고 제약조건을 반영하여야 한다. 선로용량초과분은 일반적인 전력조류계산을 통하여 얻을 수 있으며, 이를 SCOPF의 상정사고 제약조건으로서 반영하게 된다.

SCOPF에서 N-1 안전도제약을 찾기 위한 안전도해석(security analysis)은 여러 가지 방법으로 수행되나 일반적인 방법으로 민감도계수(Sensitivity Factors)를 활용한다. 기존의 민감도계수는 단순히 안전도해석(Security Analysis)분야에서 주로 사용되었으며 계통의 선형성을 가정하여 단일의 민감도계수(민감도계수 고정)를 적용하여 수행하여 왔다. 전력계통문제는 대개 비선형문제로서 해의 수렴에 있어 상당한 경험과 기술이 필요할 뿐만 아니라 수천가지의 가능성을 검토하는 데 있어서 수학적 으로 완벽한 모델을 적용하는 것은 계산속도나 계산량 측면에서 볼 때, 현실적이지 못하기 때문이었다. 그러나 이제 경쟁적 전력시장에서 송전계통의 이용률을 극대화하기 위한 방안으로 안전도해석분야에서 사용되어 오던 민감도계수를 본 연구에서는 OPF에 적용하고, On-Line 상에서의 활용방안을 제안함으로써 보다 정밀한 안전도를 고려한 SCOPF의 구현에 주안점을 둔다. 민감도 계수에 대한 내용은 다음 장에서 설명한다.

### 3. On-Line SCOPF

#### 3-1. 개요

오늘날, 전력산업은 규제완화, 경쟁체제로의 이행을 위한 큰 변화를 겪고 있는 가운데 송전망 운용의 중요성은 더욱 강조되고 있으며, 구조개편 이후 송전선로는 더욱 좁아진 여유에 의해 운용될 것으로 예상된다.

따라서 보다 정교한 실시간 계통감시와 선로의 일정 예비력(송전예비력)의 확보가 보장되어야 하며, 매 시간 경제성과 더불어, 적정 안전도 및 신뢰도를 확보할 수 있는 방안이 검토되어야 한다.

일반적으로 예비력을 고려한 안전도 기준은 대상 전력계통의 특정 계통운용조건 아래에서 상정사고를 고려한 시뮬레이션의 결과로부터 도출된다. 이러한 시뮬레이션은 통상적으로 “Off-Line” 상태에서 실행되는 것으로 관련된 수많은 요소들이 특정 계통상황에서 어떤 값으로 고정되었을 경우이다. 그러나 부하상황을 비롯한 대상 전력계통의 조건은 실시간으로 시시각각 변화한다. 따라서 대상 송전망의 운용에 있어서 유지해야 할 적정 안전도 및 신뢰도는 주기적으로 갱신되어야 한다.

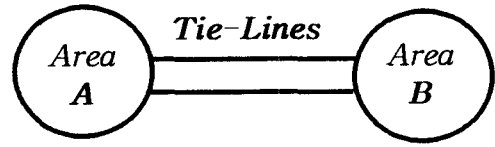


Fig. 1. Critical contingencies for system interconnection.

N-1 안전도제약(security constraints)은 안전도 해석 알고리즘을 통해 얻어지며, 안전도 해석은 SCOPF에서 계산시간을 가장 많이 요구하는 부분이다. 결국, 안전도 해석부분에서의 계산속도 향상은 SCOPF의 전체적인 성능을 향상시킬 수 있을 것이다<sup>[5]</sup>.

안전도 해석에 대한 전통적인 접근법은 계통의 성능(performance)과 계통신뢰도를 평가하기 위해 모든 상정사고를 연속적(혹은 순차적)으로 시험하는 것이다. 이러한 해석은 모선전압과 선로의 전력조류에 하나 혹은 그 이상의 발전기 및 송전설비 고장의 영향을 조사하기 위한 시뮬레이션으로 이루어진다<sup>[5]</sup>. 그러나 가능한 모든 상정사고를 포함한 철저한 상정사고 시험은 효율성에 있어서 그리고, 비용면에 있어서 지나침이 있다. 반면에, 상정사고의 시험을 계획자의 경험과 직관에 따라 선택된 상정사고의 일부분에 적용하는 것은 몇 가지 중요한 상정사고를 고려하지 못할 수 있기 때문에 이 또한 부적절하다.

이러한 이유로, 기존 연구의 대부분은 주로 상당한 시간을 필요로 하는 상정사고의 선택(Contingency Selection or Screen)과정에 대한 합리성과 계산속도의 향상에 그 초점이 맞추어져 있다.

그러나 본 연구에서는 계통 전체의 영향을 고려하는 상정사고 선택 보다는 전력의 원활한 거래를 위한 혼잡선로 관리, 또는 (Fig. 1)과 같이 계통의 연계나 신뢰도 확보를 위한 중요선로에 대해 민감도의 효율적 활용을 통한 보다 정확한 안전도를 확보한다는 데 그 중점을 둔다.

#### 3-2. 민감도계수(Sensitivity Factor)의 적용

SCOPF에 사용되는 민감도 계수는 크게 다음과 같이 분류된다.

- 발전기와 발전기 사이의 상관관계
- 발전기와 선로 사이의 상관관계
- 선로와 선로사이의 상관관계

첫 번째, 발전기간의 상관관계는 발전력 재분배와 관련된 사안으로서 본 연구의 적용대상과는 다소 차이가 있는 관계로 제외하며, 본 연구의 관심사인 계통의 주요 구성요소의 계통탈락으로 인해 송전계통이 받는 영

항에 대해 기술하기로 한다. 다음에서 설명하는 민감도 계수의 기본 식은 참고문헌<sup>16)</sup>을 바탕으로 하였다.

3-2-1. LODF(Line Outage Distribution Factor)

LODF는 선로간의 상관관계를 나타내는 민감도계수로서, 다음 식과 같이 '선로 k가 탈락할 경우 선로 l이 받는 영향'으로 정의한다. 여기서,  $\Delta f_l$ 은 전력조류계산에 의해 실제 선로탈락에 따른 해당선로를 모니터링한 결과로부터 얻을 수 있다.

$$d_{l,k} = \frac{\Delta f_l}{f_{k0}} \quad (11)$$

여기서,

$d_{l,k}$ =LODF  
 $\Delta f_l$ =선로 k 사고 후 선로 l의 조류변화량(MW)  
 $f_{k0}$ =고장 전 선로 k의 조류량(MW)

따라서, 만약 선로고장 전, 선로 l과 k 상에서의 조류량을 안다고 할 경우, 선로 k가 고장으로 탈락된 후, 선로 l에서의 조류량은 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{f}_l = f_{l0} + d_{l,k} f_{k0} \quad (12)$$

(12)식에서  $d_{l,k} f_{k0}$ 는 (11)식으로부터  $\Delta f_l$ 과 같음을 알 수 있다.

3-2-2. GSDF(Generation Shift Distribution Factor)

GSDF는 발전기와 선로간의 민감도 계수로서, 다음과 같이 '발전기 i 탈락시 선로 l이 받는 영향'으로 정의 된다. 마찬가지로  $\Delta f_l$ 은 전력조류계산으로부터 발전기탈락에 따른 해당선로조류를 모니터링하여 얻을 수 있다.

$$a_{l,i} = \frac{\Delta f_l}{\Delta P_i} \quad (13)$$

여기서,

$a_{l,i}$ =GSDF  
 $\Delta f_l$ =발전기 i 사고 후 선로 l의 조류변화량(MW)  
 $\Delta P_i$ =발전기 i의 출력변화(MW)

이 때, 사전에 계산된 민감도를 이용해서, 발전기 탈락후 선로 l에 흐르는 새로운 전력조류는 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{f}_l = f_{l,0} + a_{l,i} \Delta P_i \quad (14)$$

여기서, 발전기탈락에 따른 출력보상은 기준 발전기가 감당한다는 가정을 두고 있다. 이외에 출력보상방식은 각 발전기의 최대출력량에 비해(maximum MW rating)하는 방법, 경제성에 따라 배분하는 방법 등이 있으며, 이러한 보상방식에 따라 (14)식은 달라진다. 보다 정밀한 보상 알고리즘을 적용하려면, 복잡한 표현이 요구된다.

3-3. On-Line SCOPF 알고리즘

결국, SCOPF란 모든 선로에 있어서, 상정사고 후의 조류량( $\tilde{f}_l$ )이 해당 선로의 용량을 초과하지 않도록 발전력을 배분(경제급전)하는 작업을 말한다.

On-Line SCOPF는 민감도의 효율적 사용을 통한 실시간 SCOPF의 활용에 그 목적이 있다. 계통의 상황(부하 변동)은 시시각각 변화한다. 따라서 안전도 여유(Security Margin)는 변화된 계통의 상황에 따라 변화하게 되며 마찬가지로 해당 상정사고에 대한 민감도는 실질적으로 변화한다. 즉, 해당 상정사고에 대해 부하변동을 반영한 민감도의 적용을 통해 보다 정확한 안전도 확보가 가능하게 된다. 다시 말하면 민감도를 부하변동에 대한 시간의 함수로 보고 민감도를 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$d_{l,k}^t = \frac{\Delta f_l^t}{f_{k0}^{t-\epsilon}} \quad (15)$$

이 때의 새로운 전력조류는 식 (16)과 같다.

$$\tilde{f}_l^t = f_{l,0}^{t-\epsilon} + d_{l,k}^t f_{k0}^{t-\epsilon} \quad (16)$$

또한,

$$a_{l,i}^t = \frac{\Delta f_l^t}{\Delta P_i^{t-\epsilon}} \quad (17)$$

이 때의 새로운 전력조류는 식 (18)와 같다.

$$\tilde{f}_l^t = f_{l,0}^{t-\epsilon} + a_{l,i}^t \Delta P_i^{t-\epsilon} \quad (18)$$

여기서,

$d_{l,k}^t$ =t에서의 LODF  
 $a_{l,i}^t$ =t에서의 GSDF  
 $f_{l,0}^{t-\epsilon}, f_{k0}^{t-\epsilon}$ =고장 전(t- $\epsilon$ ) 선로 l과 k의 조류량  
 $\tilde{f}_l^t$ =선로 k 탈락 후(t) 선로 l의 조류량

결국, 시변민감도를 반영하여 구성되는 안전도 제약조건(열용량 제약)은 일정주기로 갱신되어 다음과 같이 SCOPF에 반영된다.

$$|\tilde{f}_l^t| \leq TC_l^{\max} \quad (19)$$

(Fig. 2)는 앞에서 언급한 On-Line SCOPF의 메커니즘을 보여주고 있다. 먼저, 초기시간에 관찰된 부하 데이터와 기타 계통조건(초기 모션전압 및 위상각, 발전기 출력제약, 선로용량 등)을 읽어 들이고, 전력조류계산으로부터 그 때의 민감도를 얻어낸다. 이는 SCOPF 해의 도출 시간간격에 따라 지속적으로 변화된 부하 데이터를 받아들여 민감도를 갱신시키게 되며, 이를 통해 해당 민감도를 반영한 SCOPF를 반복적으로 수행한다.

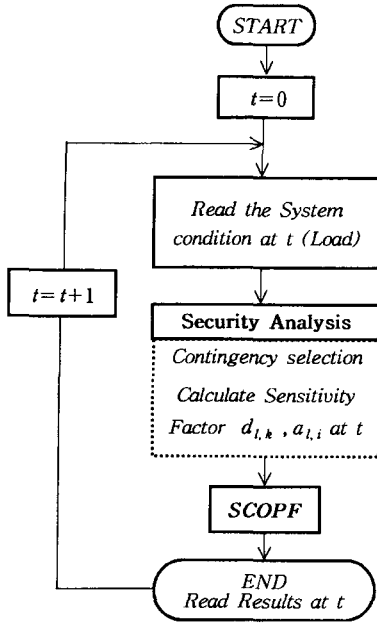


Fig. 2. On-Line SCOPF mechanism.

4. 사례연구

본 사례연구는 최적화 프로그램 GAMS<sup>[7]</sup>의 내장모듈인 MINOS5와 CONOPT를 이용하여 비용최소화 OPF 및 SCOPF를 수행하였으며, 대상 전력계통은 (Fig. 3)에 나타낸 바와 같이 수정한 18모선 계통<sup>[6]</sup>을 이용하였다.

선로 상정사고는 다음 3개의 연계선로이다. 연구취지에 따라 지역 A와 B를 연결하고 있는 각 연계선로는 상정사고시 과부하가 유발될 수 있도록 심한 제약을 두었으며, 타 선로는 용량제약에 구속되지 않도록 하였다.

- tie-1 : line 20, 선로용량 300 MW
- tie-2 : line 21, 선로용량 300 MW
- tie-3 : line 22, 선로용량 200 MW

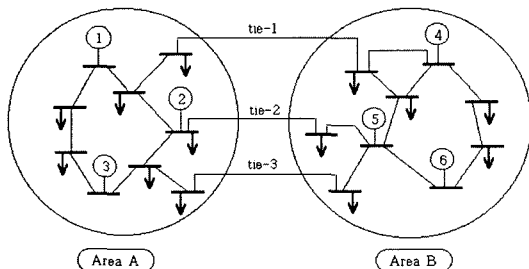


Fig. 3. 18 bus sample system.

Table 1. Generator data.

Unit No.	Cost coefficients			Unit limits	
	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$P_i^{min}$ (MW)	$P_i^{max}$ (MW)
1	950	13.41	0.002641	140	590
2	560.5	14.17	0.003496	110	500
3	560.5	14.17	0.003496	110	500
4	1122	15.84	0.003124	150	600
5	620	15.70	0.003880	100	400
6	156	15.94	0.009640	50	200

또한, 발전기 상정사고는 G5, G6을 선정하였으며, 다음은 각 발전기 데이터이다. Fig. 3에서와 같이 본 사례계통은 저렴한 발전기가 위치하는 지역 A(발전센터)와 다소 비싼 발전기가 위치하는 지역 B(부하센터)로 구성되어 있다. 따라서 연계선로의 조류흐름은 지역 A에서 지역 B로 이동한다. 특히, 본 연구의 취지에 따라 유효 전력조류에 초점을 맞추었고 무효전력 및 전압에 대한 영향을 최소화하기 위해 무효전력 출력제약을 지극히 완화하였으며, 전압제약은  $\pm 10\%$  범위에 있도록 조정하였다. 다음 Table 1은 사례계통에서의 각 6개 발전기별 비용합수와 출력 제약(최소, 최대출력)을 보인 것이다.

4-1. 민감도 갱신효과와 검증

(Table 2)와 같이 계통의 부하는 1000 MW에서 2000 MW까지 지속적으로 변화(증가)한다고 가정하여 각각의 경우에 대해 민감도를 계산하였다. 1000 MW 부하대의 민감도를 1500, 1800, 2000 MW 부하대에 각각 적용한 경우와 해당 부하대의 민감도를 적용한 경우에 대해 선로조류의 과부하여부를 검사하여 타당성을 검증하였다.

다음은 각 시간대의 부하를 고려한 민감도(LODF, GSDF) 계산결과이다. 데이터의 정확성을 위해 LODF, GSDF 계산시 전력조류계산에서의 슬랙발전기에 대한 영향을 제거하고, 순수하게 안전도제약에 따른 영향을 관찰하기 위해 기준해(초기치)를 OPF로부터 구했으며, 이를 전력조류계산에 반영하였다. 특히, GSDF 적용시 발전기 탈락에 대한 출력보상은 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 방법<sup>[5]</sup>을 준용하여 1번모선 발전기를 기준발전기로 지정하고 한 대의 발전기가 모두 보상한다고 가정하였다(1번 모선에 사양이 동일한 비상용 발전기가 있다고 가정).

Table 2. Load data (Unit : MW).

Area	Load 1	Load 2	Load 3	Load 4
A	370	560	700	780
B	630	940	1100	1220
Total	1000	1500	1800	2000

**Table 3. System Load 1000MW, LODF & GSDF.**

LODF	20 off	21 off	22 off
20	0	0.53242	0.37786
21	0.66637	0	0.63243
22	0.35130	0.46995	0
GSDF	G5 off	G6 off	
20	0.3308	0.3552	
21	0.4077	0.3906	
22	0.2713	0.2642	

**Table 5. System Load 1800 MW, LODF & GSDF.**

LODF	20 off	21 off	22 off
20	0	0.53435	0.37940
21	0.67904	0	0.63994
22	0.35536	0.47181	0
GSDF	G5 off	G6 off	
20	0.3336	0.3589	
21	0.4144	0.3958	
22	0.2721	0.2653	

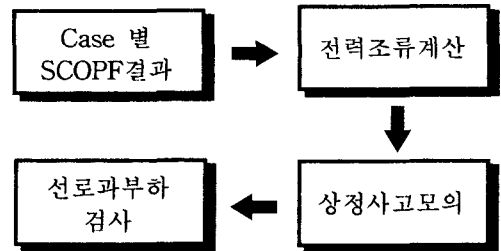
**Table 4. System Load 1500 MW, LODF & GSDF.**

LODF	20 off	21 off	22 off
20	0	0.53469	0.38034
21	0.67639	0	0.63879
22	0.35511	0.47176	0
GSDF	G5 off	G6 off	
20	0.3334	0.3580	
21	0.4123	0.3948	
22	0.2726	0.2656	

**Table 6. System Load 2000 MW, LODF & GSDF.**

LODF	20 off	21 off	22 off
20	0	0.53540	0.38017
21	0.68062	0	0.64131
22	0.35395	0.47010	0
GSDF	G5 off	G6 off	
20	0.3354	0.3602	
21	0.4153	0.3965	
22	0.2715	0.2642	

(Table 7)은 해당 시간대의 LODF를 적용한 SCOPF의 결과(Case 1, 2, 3, 4)로부터 연계선로 3선로 중 1개 선로탈락에 따른 나머지 2선로의 조류량을 나타낸 것이며, 이에 반해, Table 8은 계통부하 1000 MW시의 LODF를 1500, 1800, 2000 MW대에 반영한 SCOPF 결과(Case 5, 6, 7)를 적용한 경우이다. 각각의 경우(Case 1~7)는 (Fig. 4)와 같은 절차로 선로과부하 여부를 검사하였다. 즉, 7가지 Case에 대한 SCOPF 수행결과(P, Q, V,  $\theta$ )를 전력조류계산에 적용하고, 3개 연계선로 중 1개 선



**Fig. 4. Simulation procedure.**

**Table 7. Line flows : application of LODF calculated at appropriated system load.**

계통부하	line	선로용량	Base	tie-1 off	tie-2 off	tie-3 off
1000 MW (Case 1)	20	300.00	122.83		187.86	155.87
	21	300.00	122.14	203.99		177.45
	22	200.00	87.44	103.59	144.85	
1500 MW (Case 2)	20	300.00	175.80		273.55	219.50
	21	300.00	183.06	300.13		256.20
	22	200.00	114.98	176.98	200.95	
1800 MW (Case 3)	20	300.00	169.93		269.31	212.48
	21	300.00	186.66	300.80		257.99
	22	200.00	112.05	172.22	199.93	
2000 MW (Case 4)	20	300.00	171.67		270.37	208.62
	21	300.00	185.21	300.54		247.11
	22	200.00	97.06	157.62	183.98	

(Unit : MW)

**Table 8. Line flows : application of LODF calculated at 1000 MW system load.**

계통부하	line	선로용량	Base	tie-1 off	tie-2 off	tie-3 off
1500 MW (Case 5)	20	300.00	177.09		275.39	220.76
	21	300.00	183.98	302.95		257.05
	22	200.00	114.88	177.34	201.26	
1800 MW (Case 6)	20	300.00	171.29		271.35	214.13
	21	300.00	187.93	303.01		259.74
	22	200.00	112.81	173.47	201.28	
2000 MW (Case 7)	20	300.00	173.25		272.71	210.53
	21	300.00	186.63	303.05		249.08
	22	200.00	97.93	159.05	185.51	

(Unit : MW)

로에 대한 고의 사고를 유발시킨 후, 나머지 2개 선로에 대한 과부하 여부를 검사하였다.

해당 LODF를 적용한 경우의 (Table 7)로부터, 연계선로 20(tie-1) 탈락시 1500, 1800, 2000 MW 부하대에 선로 21에 그리고, 연계선로 21(tie-2) 탈락시 1500 MW 부하대에 선로 22에서 과부하가 발생하였으나, 1 MW 이하의 값을 보였을 뿐이다. 또한 1000 MW대의 LODF를 적용한 경우의 (Table 8)을 보면, 마찬가지로 연계선로 20(tie-1) 탈락시 1500, 1800, 2000 MW 부하대에 선로 21에 그리고, 연계선로 21(tie-2) 탈락시 1500, 1800 MW 부하대에 과부하가 발생한 것을 확인할 수 있는데, 연계선로 20 탈락시에는 모두 3 MW 정도의 과부하가 검출되었다. 검증과정상 전력조류계산과 SCOPF의 병행이 불가피하기 때문에 어느 정도의 미세한 오차는 발생한다. 본 연구에서는 이러한 오차의 범위를 개략적으로 파악하기 위해 발전기의 출력량과 연계선로조류량에 있어 초기 Base 해를 위한 OPF의 결과값과 이를 초기치(P, Q, V,  $\theta$ )로 하여 도출된 전력조류계산의 결과값이 0.1 MW 단위까지 같다는 것을 확인하였다. 즉, 1 MW 이하의 수치는 검증과정상의 미세오차로 인정할 경우, 해당 민감도가 아닌 기존(1000 MW 부하대)의 민감도계수를 적용한 경우에 대해 과부하가 발생하였음을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 볼 때, 단일의 민감도계수 적용은 정확한 안전도를 확보할 수 없으며, 민감도 계수의 갱신을 통해 보다 정밀한 안전도를 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다.

GSDF의 경우에서도 본 사례계통 결과 발전기탈락(G5, G6)의 결과 선로과부하가 발견되었으나, 연계선로탈락에 따른 영향보다는 크지 않았다. 사실, GSDF는 발전기 탈락에 따른 출력보상방식 및 대상 계통이 가지고 있는 corrective control 메커니즘에 따라 값이 달라지기 때문에 검증의 의미가 크지 않다. 또한 이에 따른 출력패턴이 초기해와 다소 차이가 발생하므로 검증상의 오차가 상당히 클 수 있다. 따라서, 위의 검증은 LODF에만 국

한하기로 하며 다만 본 사례연구에서는 앞에서 가정한 GSDF 결정방법을 준용하기로 한다.

#### 4.2. SCOPF의 결과비교

다음 (Table 9)는 상정사고를 고려하지 않은 OPF의 계산결과로서, 각 부하대에 따른 연계선로 조류량 및 전체연료비용)를 보인 것이다. 또한 (Table 10)은 OPF 결과(Table 9)를 초기해로 하여 계산된 민감도계수를 안전도제약으로 고려한 SCOPF의 결과로서, GSDF만을 적용한 경우, LODF만을 적용한 경우, 그리고 두 계수를 모두 적용한 경우의 연계선로 조류량 및 전체연료비를 비교한 것이다.

(Table 9)와 (Table 10)으로부터 1000 MW대에는 안전도제약에 구속이 없음(결과가 OPF 및 SCOPF가 동일)을 확인할 수 있으며, 안전도제약의 결과는 계통부하가 1500 MW 이상으로 상승하였을 때부터 확인이 가능하다. 안전도제약을 고려한 SCOPF의 결과는 OPF의 결과에 비해 연계선로의 총조류량이 상당부분 감소하였으며, 따라서, 비싼 발전기가 분포하고 있는 B지역의 발전기 가동으로 인해 비용상승을 수반하였다. 먼저, GSDF만을 적용한 결과, 1500, 1800, 2000 MW 부하대에 3개 연계선로조류의 합이 감소하였음과 동시에 비용이 상승하고 있음을 알 수 있다. 또한, GSDF와 LODF를 모두 적용한 결과(both)의 값이 LODF만 적용한 값과 동일함을 확인할 수 있는데, 이는 본 사례계통에서 안전도제약이

**Table 9. OPF (initial condition) result.**

	1000 MW	1500 MW	1800 MW	2000 MW
line 20	122.714	226.216	231.288	239.960
line 21	122.281	238.983	256.475	267.248
line 22	87.418	153.162	151.989	142.899
total flow	332.413	618.362	639.752	650.107
cost	19087	27125	32183	35639

**Table 10. SCOPF result (MW).**

Case		1000 MW	1500 MW	1800 MW	2000 MW
GSDF only	flow	332.414	618.351	582.241	545.964
	cost	19087	27125	32212	35737
LODF only	flow	332.414	473.847	468.663	453.968
	cost	19087	27191	32281	35780
Both	flow	332.414	473.847	468.663	453.968
	cost	19087	27191	32281	35780

**Table 11. SCOPF result : application of sensitivity calculated at 1000 MW system load.**

Case	1500 MW	1800 MW	2000 MW
total flow	475.956	472.047	460.932
cost	27189	32277	35778

모두 LODF에 의해 영향을 받고 있음을 나타낸다(LODF에 의한 제약식이 보다 구속적임).

다음으로, On-Line 상에서의 민감도 갱신에 따른 효과를 살펴보기 위해 앞에서의 사례연구와 마찬가지로 1000 MW 부하대에서 결정된 GSDF 및 LODF를 1500, 1800, 2000 MW 부하대에 적용해 보았다.

(Table 11)은 처음 1000 MW 부하대에서 결정된 민감도 계수(both)를 이후 1500, 1800, 2000 MW 부하대에 적용한 SCOPF결과로서 도출된 연계선로 총조류량과 비용을 나타낸 것이다. (Table 10)과 비교하여 전체적으로 연계선로 조류량이 증가하였으며, 이에 따라 비용이 다소 감소하였음을 알 수 있다. 이는 해당 민감도가 아닌 1000 MW 부하대에서의 보다 완화된 안전도제약을 적용한 결과로서, 이러한 경우, 앞에서의 사례연구에서 정확한 안전도를 반영하지 못한다는 것을 보였다. 위와 같은 결과로 볼 때, 단일의 민감도계수적용은 오히려, 비용을 상승시킬 가능성도 있다는 의미이다. 실제, 1800 MW 부하대에 2000 MW에서 결정된 민감도계수를 적용한 결과 다소 비용이 상승함과 동시에 연계선로조류량이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 실제보다 지나친 안전도제약을 적용한 결과이다.

### 5. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 SCOPF의 구현에 있어서, 해당 상정사고에 대한 민감도를 대상 부하의 변동에 대응하여 시간의 함수로 반영하였고, 그 적용 알고리즘을 구현해 보았다. 즉, 해당시간, 해당 계통부하를 반영한 On-Line SCOPF의 결과와 과거의 민감도 적용을 통한 SCOPF와의 결과를 비교해 봄으로써 민감도 갱신을 통한 효과를 확인하였다. 제안된 On-Line SCOPF 알고리즘은 민감도의 효율적 사용을 통한 계통운용상의 적정 안전도 확보

와 동시에 OPF의 활용 가능성을 보이는 데 그 목적이 있다. 본 연구가 보다 합리성을 갖기 위해서는 정교한 민감도를 확보하는 방법에 대한 연구가 뒷받침 되어야 할 것이다. 더불어, 안전도 제약조건의 반영을 통해 상정사고에 대한 전압안정도나 동태특성에 대한 영향 역시 완화되는 것이 일반적이지만, 이는 문제점 자체를 해결할 수는 없으므로, 향후, 실시간으로 구현되는 알고리즘에 안전도나 동태특성을 나타내는 지수를 추가적으로 반영할 수 있는 알고리즘의 제시가 필요하다 하겠다.

### 감사의 글

“이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음” (KRF-2001-041-E00136).

### 참고문헌

1. Marija Ilic, Francisco Galiana and Lester Fink: “Power System Restructuring : Engineering Economics”, Kluwer Academic Publishers (1998).
2. 김발호 외: “계통운영상의 적정 송전능력 산정에 관한 연구”, 한국전력공사 계통운용처 (2000).
3. Harsan, H., Hadjsaid, N. and Pruvot, P.: “Cyclic Security Analysis for Security Constrained Optimal Power Flow”, IEEE Transaction on Power Systems, 12(2), May (1997).
4. Ebrahim Vaahedi, H. Magdy Zein El-Din: “Considerations in Applying Optimal Power Flow to Power System Operation”, IEEE Transactions on Power System, 4(2), May (1989).
5. Ejebe, G.C.: “Automatic Contingency Selection”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, January/February, pp. 107-112 (1979).
6. Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg: “Power Generation, Operation, and Control”, 2nd Ed. A Wiley-Interscience Publication (1996).
7. Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus. GAMS User’s Guide. The Scientific Press, Redwood City, CA (1990).