

On-Line SCOPF 알고리즘의 적용에 관한 연구

신영균* 김발호
충의대학교

An Implementation of On-Line SCOPF Algorithm

Young Kyun. Shin Balho H. Kim
Hong-ik University

Abstract - As power systems tend to be operated more closely to their ultimate ratings, the role of SCOPF is changed and the importance for real-time security inhancement will be more increased in the new and competitive electricity market.

This paper deals with the application of the SCOPF which make possible the On-Line application. The security margin of power system truly is changed according to the conditions or configuration of power system, 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 proposed mechnism has been tested on modified Woolenberg 18-bus system and the results show more secure conditions against critical contingencies.

1. 서 론

전력산업에 있어서의 최근 움직임은 기존 수직독점체제하에서의 공기업으로부터 규제완화된 경쟁적 전력시장으로 전환으로 요약될 수 있다. 전력산업 구조개편은 계통운용의 효율성 확보, 합리적인 요율체계의 확립 등을 필요로 함에 따라 경제급전과 전력조류계산을 동시에 수행하는 최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)의 필요성이 어느 때보다도 강조되고 있다. 과거 상당한 계산량 및 계산시간이 필요한 OPF는 주로, 계통계획과 같은 부문에서만 일부 사용되어 왔으나, 오늘날 정보통신 및 컴퓨터 기술의 향상에 힘입어 OPF의 실시간 적용이 가능하게 되었고, 실질적인 계통운용의 수단으로서 활용할 수 있는 단계에 이르렀다.

계통의 운전에 있어서, 경제성과 더불어 최우선으로 고려되어야 할 요소는 계통을 안정적으로 운용하는 것, 즉 적정수준의 계통안전도(System Security)를 유지하는 것이다. 따라서, 상정사고를 고려한 최적조류계산 즉, SCOPF(Security Constrained OPF)는 보다 경제적인 계통운용과 복잡한 전력거래가 이루어질 것으로 예상되는 구조개편 이후 많은 문제를 해결할 수 있는 고도의 기술로 활용될 수 있다.

2. On-Line SCOPF

2.1 개요

일반적으로 예비력을 고려한 안전도 기준은 대상 전력 계통의 특정 계통운용 조건아래에서 상정사고를 고려한 시뮬레이션의 결과로부터 도출된다. 이러한 시뮬레이션은 통상적으로 "Off-Line"상태에서 실행되는 것으로서, 관련된 수많은 요소들이 특정 계통상황에서 어떤 값으로 고정되었을 때의 경우이다. 그러나 부하상황을 비롯한

대상 전력계통의 조건은 실시간으로 시시각각 변화한다. 따라서, 대상 송전망의 운용에 있어서 유지해야 할 적정 안전도 및 신뢰도는 주기적으로 갱신되어야 한다.

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 신뢰의 일정 예비력(송전예비력)의 확보가 보장되어야 하며, 매 시간 비용을 최소화하면서, 적정 안전도 및 신뢰도를 확보할 수 있는 방안이 검토되어야 한다.

대부분의 전력계통은 상시운전감시(monitoring)체제를 갖추고 있으며 신뢰성있는 방식으로 운전되고 있다. 계통안전도 유지를 위해 필요한 사항은 다음과 같이 3가지로 구분할 수 있다.

- System Monitoring (계통감시)
- Contingency Analysis (상정사고 분석)
- SCOPF (안전도계약 최적조류계산)

SCOPF란 상정사고를 고려한 최적조류계산으로서, 계통설비(발전설비 및 송배전설비)의 일부가 돌발적인 사고로 계통으로부터 이탈되더라도 일정기술기준을 만족하면서 계속 안정적으로 운전되도록 경제급전계획을 수립하는 과정을 말하며, 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

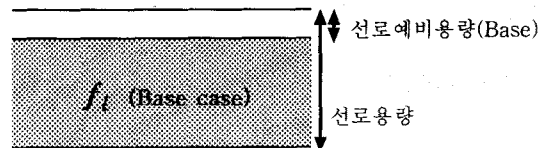
$$\begin{aligned} \min f(X) & \quad (1) \\ \text{s.t. } g(X) &= 0 & (2) \\ h(X) &\leq 0 \end{aligned}$$

여기서, 목적함수(1)는 발전비용, 손실 등이 될 수 있고, 제약조건(2)은 전력균형방정식, 전압크기, 전압위상각, 발전기의 최대, 최소출력제약 등이며, 안전도 제약조건을 포함한다.

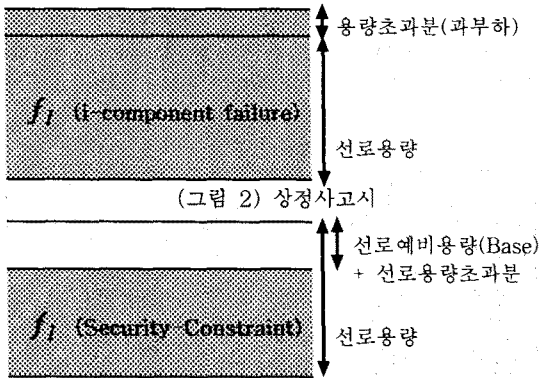
2.2 안전도(Security)의 개념

계통운전에 있어 경제성보다 우선적으로 고려되어야 할 것이 적정 계통안전도(System Security)를 유지하는 일이다. 계통안전도란 계통의 일부(발전, 송배전설비)가 돌발적인 사고에 의해 상실되었을 경우에도 계통이 계속 일정운전기준을 만족하면서 운전될 수 있는 정도를 말하는 것으로서 계통신뢰도(reliability) 및 계통안정도(stability)와 밀접한 관련이 있다.[7]

다음 그림과 같은 개념으로 안전도를 확보할 수 있다.



(그림 1) Base Case



(그림 2) 상정사고시

(그림 1)과 같이 대부분의 전력계통은 일정 선로예비력을 가지고 운용하게 된다. 그러나, 계통의 일부고장(상정사고)으로 인하여 (그림 2)와 같이 선로조류가 선로용량을 초과하여 흐를 수 있으며, 이와 같은 상황에서는 선로의 연쇄적 붕괴를 가져올 수 있다. 따라서, 돌발적인 사고의 경우 발생하는 선로용량 초과분을 할당하여 운전되도록 상정사고제약조건을 반영하여야 한다. 선로용량초과분은 일반적인 전력조류계산을 통하여 얻을 수 있으며, 이를 SCOPF의 제약조건으로 반영한 경우 (그림 3)과 같이 적용된다.

2.3 민감도(Sensitivity Factor)의 적용

SCOPF에 사용되는 민감도계수는 크게 발전기간의 상관관계, 발전기와 선로의 상관관계, 그리고 선로간의 상관관계로 구분된다. 여기서는 본 연구에서 적용한 GSDF(Generation Shift Distribution Factor)와 LODF(Line Outage Distribution Factor)에 대해 설명한다.

2.3.1 GSDF

GSDF는 발전기와 선로간의 민감도 계수로서, 다음과 같이 발전기 g 탈락시 선로 l 이 받는 영향으로 정의된다. [2][5]

$$a_{l,g}^t = \frac{\Delta f_l}{\Delta P_g} \quad (4)$$

여기서,

$a_{l,g}^t$ = t 에서의 GSDF

Δf_l = 상정사고 후 선로 l 의 조류변화량(MW)

ΔP_g = 발전기 g 의 출력변화(MW)

이 때, Power Flow로부터 미리 계산된 민감도를 이용하여, 발전기 탈락후 선로 l 에 흐르는 새로운 전력조류는 다음과 같이 계산된다.

$$f_l^{new} = f_l^{old} + a_{l,g} \Delta P_g \quad (5)$$

2.3.2 LODF

LODF는 선로간의 상관관계를 나타내는 민감도계수로서, 다음 식과 같이 선로 k 가 탈락할 경우 선로 l 이 받는 영향으로 정의한다. [2]

$$d_{l,k}^t = \frac{\Delta f_l}{f_{k0}} \quad (6)$$

여기서,

$d_{l,k}^t$ = t 에서의 선로 민감도

Δf_l = 상정사고 후 선로 l 의 조류변화량 (MW)

f_{k0} = 고장 전 선로 k 의 조류량(MW)

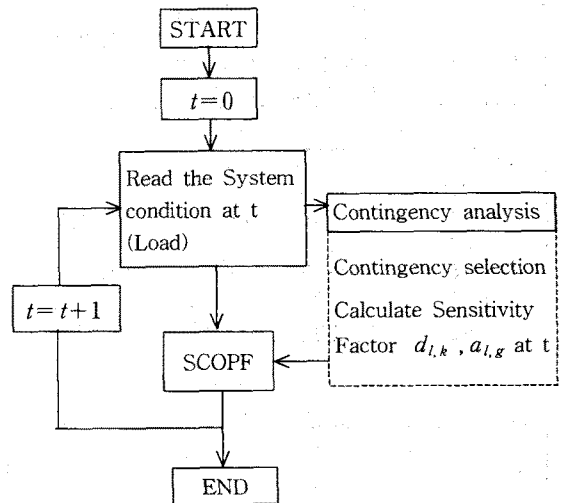
따라서, 만약 선로고장 전, 선로 l 과 k 상에서의 조

류량을 안다고 할 경우, 선로 k 가 고장으로 탈락된 후, 선로 l 에서의 조류량은 다음과 같이 계산된다.

$$f_l = f_{l0} + d_{l,k} f_{k0} \quad (7)$$

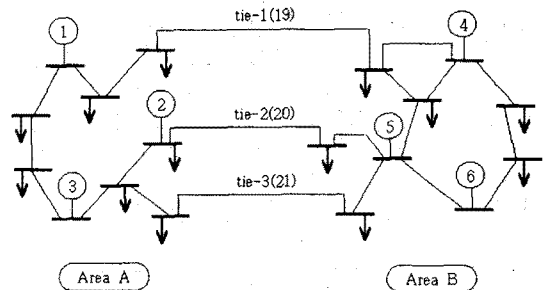
2.4 On-Line SCOPF 알고리즘

다음 (그림 4)는 On-Line SCOPF의 메커니즘을 보여주고 있다. 먼저, 임의의 시간에 관찰된 초기 부하데이터와 기타 계통조건(초기 모션전압 및 위상각, 발전기 출력제약, 선로정수 등)을 읽어 들이고, 전력조류계산으로부터 그 때의 민감도를 얻어낸다. 이는 해의 도출시간 간격에 따라 지속적으로 변화된 부하데이터를 받아들여 민감도를 갱신시키게 되며, 이를 통해 반복적으로 SCOPF를 수행한다.



(그림 4) On-Line SCOPF의 메커니즘

3. 사례 연구



(그림 5) 사례연구 모의계통

본 사례연구는 최적화 프로그램 GAMS[5]의 내장모듈인 MINOS5, CONOPT를 이용하여 OPF 및 SCOPF를 수행하였으며, 대상 계통은 Woolenberg 18bus 계통을 필요상 수정하여 이용하였다.(그림 5)

선로 상정사고는 연계선로 19(용량 155MW), 20(용량 120MW), 21(용량 155MW)번 선로를 대상으로 하였고, 발전기 상정사고는 G2, G3를 선정하였다.

t-1(2000MW), t0(1500MW), t+1(1800MW)의 연속된 시간대의 부하변화를 고려하여 민감도를 계산하였고, 이전 시간대의 민감도를 적용한 경우와 같은 시간대의 민감도를 적용한 경우에 대해 선로조류의 과부하 여부를 검사하였다.

(표 1)과 (표 2)는 각 부하시간대의 민감도(LODF, GSDF)계산 결과이다.

(표 3)~(표 8)은 LODF만을 적용한 SCOPF로부터 도출된 결과를 이용하여 전력조류계산에 적용 하였을 때, 이전 시간대의 민감도를 적용한 경우와 같은 시간대의 민감도를 적용한 경우에 대해 선로조류의 과부하여부를 검사한 것이며, 음영처리 된 부분에 선로과부하가 발생하였음을 보여준다.

(표 1) LODF

off		t-1	t0	t+1
19	19	0.00000	0.00000	0.00000
	20	0.46624	0.46921	0.46880
	21	0.52533	0.52707	0.52784
20	19	0.29847	0.29920	0.29876
	20	0.00000	0.00000	0.00000
	21	0.69135	0.69283	0.69267
21	19	0.33400	0.33349	0.33427
	20	0.67304	0.67205	0.67169
	21	0.00000	0.00000	0.00000

(표 2) GSDF

off		t-1	t0	t+1
G2	19	-0.14524	0.12080	-0.10548
	20	0.55099	0.66140	0.56699
	21	0.08672	0.21400	0.11066
G3	19	0.11735	0.33460	0.12505
	20	0.12722	0.27380	0.10166
	21	0.24556	0.34760	0.26501

(표 3) t-1 : t-1 민감도 적용

line	BASECASE	line19 off	line 20 off	line 21 off
19	1.0185	0.0000	1.1499	1.3577
20	0.4403	0.9151	0.0000	1.1238
21	1.0156	1.5500	1.3200	0.0000

(표 4) t0 : t-1 민감도 적용

line	BASECASE	line19 off	line 20 off	line 21 off
19	1.2894	0.0000	1.4697	1.5263
20	0.6042	2.053	0.0000	1.0817
21	0.7095	1.3868	1.1272	0.0000

(표 5) t0 : t0 민감도 적용

line	BASECASE	line19 off	line 20 off	line 21 off
19	1.2800	0.0000	1.4605	1.5160
20	0.6003	1.2000	0.0000	1.0779
21	0.7062	1.3808	1.1241	0.0000

(표 6) t+1 : t-1 민감도 적용

line	BASECASE	line19 off	line 20 off	line 21 off
19	1.2635	0.0000	1.3999	1.5561
20	0.4605	1.0495	0.0000	1.0413
21	0.8763	1.5400	1.1946	0.0000

(표 7) t+1 : t0 민감도 적용

line	BASECASE	line19 off	line 20 off	line 21 off
19	1.2608	0.0000	1.3982	1.5520
20	0.4595	1.0510	0.0000	1.0480
21	0.8742	1.5387	1.1925	0.0000

(표 8) t+1 : t+1 민감도 적용

line	BASECASE	line19 off	line 20 off	line 21 off
19	1.2600	0.0000	1.3970	1.5501
20	0.4589	1.0496	0.0000	1.0409
21	0.8679	1.5329	1.1834	0.0000

(표 9)와 (표 10)은 위 사례연구 모의계통에 대해 OPF와 위에서 계산된 민감도를 적용한 SCOPF의 계산결과를 바탕으로 선로조류량과 비용을 비교한 것이다.

(표 9) OPF 계산결과 요약

	t-1	t0	t+1
line 19	1.330	1.286	1.306
line 20	0.630	0.627	0.443
line 21	1.207	0.713	0.870
total	3.167	2.619	2.626
cost	3553.9	2703.4	3207.3

(표 10) SCOPF 계산결과 요약

	t-1	t0	t+1
line 19	0.582	1.194	1.006
line 20	0.008	0.539	0.245
line 21	0.740	0.701	0.713
total	1.330	2.434	1.964
cost	3574.7	2704.9	3210.4

(표 10)에서는 n-1 contingency 기준이므로, 그 결과가 LODF와 GSDF중 보다 엄격한 제약에 구속되는 경우에 대해서만 영향을 받게 된다.

안전도 제약조건으로 인해 용량제약 뿐 아니라 전압 및 무효전력제약조건에 상당부분 구속되어, 그 결과가 (표 9)의 OPF결과와 비교하여 상당한 차이가 있다.

4. 결론 및 향후연구과제

본 논문에서는 상정사고를 고려한 SCOPF의 구현에 있어서, 민감도를 대상 부하의 변동에 대응하여 시간의 함수로 반영하였고, 그 적용 알고리즘을 구현해 보았다. 즉, 해당 시간, 해당 부하를 반영한 On-Line SCOPF와 과거의 민감도 적용을 통한 SCOPF의 결과를 비교해 봄으로써 필요성과 가능성을 확인하였다.

안전도 제약조건을 통해 전압안정도 역시 향상하는 것이 일반적이지만, 이는 예상일 뿐 문제점 자체를 해결할 수는 없다. 향후, 실시간으로 구현되는 알고리즘에 안정도 지수를 추가적으로 반영한 알고리즘의 제시가 필요하다 하겠다.

(참 고 문 헌)

- [1] Marija Ilic, Francisco Galiana, Lester Fink "Power System Restructuring: Engineering Economics" Kluwer Academic Publishers, pp15~107, 1998.
- [2] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg "Power Generation, Operation, and Control" 2nd Ed, A Wiley-Interscience Publication, pp410~452, 1996.
- [3] "계통운영상의 적정 송전능력 산정에 관한 연구" 한국전력공사 계통운용처, 2000.1.
- [4] "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구" 한국전력공사 계통운용처, 1999, 8.
- [5] Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus. GAMS User's Guide. The Scientific Press, Redwood City, CA, 1990.
- [6] Wai Y. Ng, "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No 3, March 1981.
- [7] A. Moticelli, "State Estimation in Electric Power Systems, A Generalized Approach", pp1~13, 1999.