2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2006. 7. 12 - 14

SC-OPF의 민감도 계수를 이용한 발전기 기동·정지계획

김광모, 정구형, 한석만, 김발호
홍익대학교

The Unit Commitment Using the Sensitivity Factor of Security Constrained Optimal Power Flow

Kwang-Mo Kim, Koo-Hyung Chung, Seok-Man Han, Balho H. Kim
Hong-Ik University

Abstract - The recent movement to deregulated and competitive electri city market requires new concepts against existing central dispatch in th e system operation and planning. As power systems tend to be operated more closely to their ultimate ratings, the role of SCOPF(Security Constr ained Optimal Power Flow) is changed.

This paper deals with the proper Unit Commitment condition changed a ccording to the conditions or configuration of power system. This goal o f this paper is to obtain proper security and Optimal UC condition throu gh the efficient usage of the sensitivity Factor against critical contingenc ies. The proposed mechanism has been tested on a sample system and r esults show more secure conditions against critical contingencies

1. 서 론

전력산업에 "경쟁(competition)"의 개념이 도입된 이후, 보다 효율적인 계통운영과 규제 완화된 전력시장의 진보를 위한 다양한 연구가 시도되고 있다. 이러한 구조 개편된 전력시장에 있어서 계통운용의 효율성 확보, 합리적인 요율체계 확립 등을 위하여 경제급전과 전력조류 계산을 동시에 수행할 수 있는 최적조류계산(Optimal Power Flow)의 필요성이 대두되고 있다. 지금까지 OPF문제는 방대한 계산량 및 과도한 계산시간 등을 이유로 실시간으로 적용하기가 어려웠으나, 컴퓨터 및 정보통신 기술의 발달에 힘입어 최적조류계산(Optimal power Flow)은 기존의 제한적인 범위를 벗어나 실질적인 계통운용의 수단으로서 그 활용영역을 확장시키고 있다. 이에 따라서 실질적인 계통운용의 수단으로 활용될 수 있는 OPF에 관한 연구가 시급하다 할 수 있다.

실질적인 계통운용에 있어서 경제성과 더불어 최우선으로 고려되어야 할 요소는 안정적으로 운용하는 것, 즉 계통 안정도(System Security)를 유지하는 일이다. 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. 또한 전력계통에서 일간/년간에 해당하는 미래 부하를 충족시키기 위해 계통 총비용 최소화 측면의 발전기 기동·정지계획(Unit Commitment)을 수립함으로서 계통 신뢰도나 경제적 측면을 고려하여 최적 계통 상태를 유지할 수 있다.

본 연구에서는 계통 안정도 확보와 최적 발전기 기동·정지 상태를 확보하기 위한 방안으로 N-1 선로/ 발전기 상정사고 기준을 적용하여 상정사고가 일어나더라도, 계통의 안정성 확보와 최적 발전기 기동·정지 상태 파악하는 것이 주목적이 되며, 상정사고시 실질적인 계통운용의 수단으로서 활용하기 위한 일환으로 시시각각 변화하는 계통상황에 응동하는 민감도(Sensitivity Factor)를 적용함으로써 정확한 안전도를 확보하고, 모의계통을 통해 활용상의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 발전기 기동·정지 계획(Unit Commitment)

발전기 기동·정지계획(Unit Commitment)은 일간/년간에 해당하는 수요를 충족시키기 위해 운용할 발전기를 결정하는 과정으로서 계통 총비용을 최소화하는 발전기들의 기동·정지를 결정하는 것이다. 일반적인 UC는 계통 총비용을 목적함수로 하고, 제약조건에는 등식제약과 부등제약으로 구성되며, 정식화는 다음과 같다.

$$Minimize : \sum_i [F_i H_i(P_i) + STC_i(P_i) + MC_i(P_i)] \quad (1)$$

$$\text{s.t } g(x) = 0 \quad (2)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (3)$$

여기서, $F_i H_i(P_i)$: Generation Cost
$STC_i(P_i)$: Start-Up Cost
$MC_i(P_i)$: Maintenance Cost

등식제약조건은 모선별 전력수급균형제약이며, 부등식제약조건은 예비력 제약, 발전기 용량제약, 최소 기동·정지 시간 제약, 의무가동 제약과 같은 운전조건이 포함된다.

2.2 최적조류계산(Optimal Power Flow)

OPF는 기술적, 물리적, 환경적 제약조건하에서 경제급전계획을 의미하며, 개념적으로 경제급전계획과 전력조류계산을 동시에 수행하는 것이다. OPF는 유효전력생산비용을 목적함수로 하고 제약조건은 등식제약과 부등식 제약으로 구성되며 정식화는 다음과 같다.

$$Minimize : F(E) \quad (4)$$

$$\text{s.t } G(E) = 0 \quad (5)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (6)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (7)$$

$$V^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (8)$$

$$|f_l| \leq TC_l^{\max} \quad (9)$$

여기서, Gi : 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 (5))은 각 모선에서의 유/무효 전력 균형을 위한 전력조류 방정식을 의미하며, 부등제약으로서는 발전기 모선의 유/무효 전력에 대한 출력제약식(식 (6)(7))과 각 모선의 전압 상·하한치(식 (8)) 및 선로용량 제약조건(식 (9))을 비롯한 운전상의 제약조건을 포함한다.

2.3 안전도(Security)

안전도란 송전선로 또는 예상하지 못한 계통설비 탈락과 같은 갑작스런 외란에 대해 전력계통이 얼마나 안전하게 운용될 수 있는가를 나타내는 척도로서, 안전도 제약은 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 만족되어야함

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

본 연구에서는 발전기 탈락 전후의 발전기들의 기동·정지 상태를 파악하고, 최적 경제급전 상태를 도출하기위해, 민감도 계수를 이용하여 새롭게 도출된 안전도 제약조건을 부과하여 최적조류계산에 반영하는 방안에 대한 연구를 수행하였다.

2.4 안전도 제약 최적조류계산(SCOPF)

2.4.1 SCOPF의 특징

SCOPF란 상정사고를 고려한 혹은 상정사고 제약조건을 갖는 최적조류계산(OPF)으로서, 단일 상정사고(single outage)에서도 전력계통에서의 여러 가지 운전제약을 만족하는 최적의 운전점을 찾는 과정을 말한다. SCOPF는 최적화의 결과로서 다양한 상정사고 후 전력조류가 안전도제약을 위배하지 않도록 한다. 여기서 고장 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.

2.4.2 민감도계수(sensitivity Factor)의 적용

SCOPF에 사용되는 민감도 계수는 크게 다음과 같이 분류된다.
- 발전기와 발전기 사이의 상관관계
- 발전기와 선로사이의 상관관계
- 선로와 선로사이의 상관관계

본 연구의 관심사인 계통의 구성요소의 계통탈락으로 인해 발전계통이 받는 영향에 대해 기술하기 위해 발전기와 선로사이의 관계를 살펴본다. 다음에서 설명하는 민감도 계수의 기본식은 참고문헌[3]을 바탕으로 하였다.

2.4.2.1 GSDF(Generation Shift Distribution Factor)

GSDF는 발전기와 선로간의 민감도 계수로서, 다음과 같이 '발전기 i 탈락 시 선로 l이 받는 영향'으로 정의된다. 마찬가지로 Δf_l은 전력조류계산으로부터 발전기 탈락에 따른 해당 선로조류를 모니터링하여 얻을 수 있다.

$$a_{l,i} = \frac{\Delta f_l}{\Delta P_i} \tag{10}$$

여기서, $a_{l,i}$: GSDF

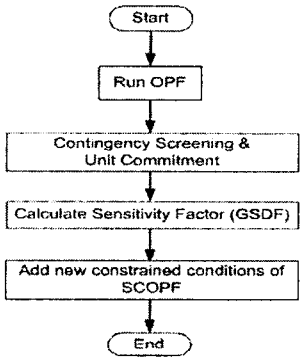
Δf_l : 발전기 i사고 후 선로 l의 조류변화량(MW)

ΔP_i : 발전기 i의 출력변화(MW)

이 때, 사전에 계산된 민감도를 이용해서, 발전기 탈락 후 선로l에 흐르는 새로운 전력조류는 다음과 같이 계산된다.

$$f_l = f_{l,0} + a_{l,i}\Delta P_i \tag{11}$$

이러한 민감도 계수를 이용하여 최적 발전기 기동·정지계획을 구성하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

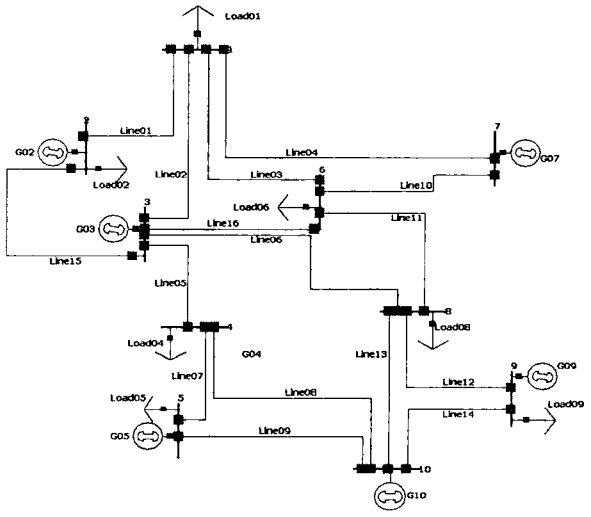


<그림 1> Algorithm

2.5 사례연구

본 연구에서는 GAMS(CONOPT, MINOS5) 와 PowerWorld 프로그램을 이용하여 SCOPF를 구현 및 검증하였으며[4,5], 사례연구는 그림(2)의 10모선 사례계통를 이용하여 수행하였다.

본 연구에서는 발전기 G2와 G9만의 상정사고를 고려하여 선로 1, 3, 6의 조류변화량를 파악하여 민감도 계수를 측정하였다. 민감도계수를 가지고 SCOPF를 실행한 결과를 OPF값과 비교하여 발전비용 및 발전량 변화 차이를 살펴보았다.



<그림 2> 10모선 사례 시스템

2.5.1 시간대별 발전 데이터 및 부하데이터

발전데이터와 시간대별부하데이터는 다음 표와 같다.

<표 1> 발전 데이터 (MW)

발전기 NO.	MAXCAP	MINCAP	Cost Coefficient		
			a_i	b_i	c_i
G02	400	200	-2171.56	76.83	0.07401
G03	500	200	-844.13	69.28	0.08701
G05	700	300	-2052.23	58.20	0.03963
G07	800	350	-1924.59	68.63	0.03626
G09	1000	500	-4488.75	55.28	0.01109
G10	1000	500	-909.46	24.42	0.03074

<표 2> 시간대별 부하데이터 (MW)

구 분	T	T+1	T+2
Bus01	748	822	904
Bus02	204	224	246
Bus04	204	224	246
Bus05	204	224	246
Bus06	272	299	328
Bus08	204	224	246
Bus09	544	598	657
총	2,380	2,615	2,873

2.5.2 민감도 계수(GSDF)

상정사고 시 발전기와 선로간의 민감도계수는 다음 표와 같다.

<표 3> 민감도 계수(GSDF)

선로 / off	T			T+1		
	Line01	Line06	Line12	Line01	Line06	Line12
G2	0.6724	-0.1447	-0.2047	0.6732	-0.1444	-0.2054
G9	-1.2620	0.0318	0.3627	-0.0059	0.0319	0.3625
선로 / off	T+2					
	Line01	Line06	Line12			
G2	0.6738	-0.1445	-0.2062			
G9	-0.0059	0.0319	0.3623			

2.5.3 OPF와 SCOPF 계산결과 요약

<표 4> OPF와 SCOPF 계산결과 요약 (MW)

발전기 NO.	OPF			SCOPF		
	T	T+1	T+2	T	T+1	T+2
G02	218.31	311.51	400.00	203.73	265.29	360.84
G09	578.19	673.38	768.39	595.02	648.16	687.15
Total Cost	147114	168102	193112	150347	173243	200117

선 로	OPF			SCOPF		
	T	T+1	T+2	T	T+1	T+2
Line01	78.18	135.04	189.02	68.34	105.42	130.5
Line06	36.29	30.50	44.33	36.29	30.50	1.79
Line12	187.36	197.12	237.59	187.36	197.12	80.26

위의 표를 보면 OPF와 상당한 차이가 있다. 즉, 발전기 탈락으로 인해 총 비용이 변화하였으며, 그로인해 발전기들의 출력 증감현상이 나타났다. 또한 선로 1, 3, 6선로에 있어서도 조류변화가 나타났다.

3. 결 론

상정사고시 민감도 계수(GSDF)를 안전도제약조건에 추가함으로서 발전기 또는 선로에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 알아보았다. 안전도제약으로 인해 각 선로의 조류가 변화하며, 발전기들의 기동상태가 변화하였다. 이러한 영향을 바탕으로 상정사고시 발전기들의 최적 기동·정지 상태를 고려하여 경제적 계통운전을 수행할 수 있다.

감사의 글

"이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00290)"

[참 고 문 헌]

[1] SHEBLE, G.B., and FAHD, G.N. "Unit Commitment literature synopsis", IEEE TRANS., 1994, PS-9, pp. 128-135

[2] 김발호, "최적조류계산의 이론과 응용", 홍익대학교, 2001

[3] Wood Wollenberg, "Power generation, operation, and control", Wiley Intersience, 1996

[4] Richard. E. Rosenthal, "GAMS A User's Guide", GAMS Development Corporation, 1998

[5] "PowerWorld Simulator 9.0 User's Guide", Powerworld Corporation