

안전도를 고려한 제약 선행급전 알고리즘에 관한 연구

김광모, 정구형, 한석만, 박경한, 김발호
충익대학교

A study on a constrained pre-dispatch algorithm with considered security

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

Abstract - Systematic studies on the dispatch scheduling algorithm and related constraints can enhance the effectiveness of electricity market operation. Moreover the introduction of competition in electricity market emphasizes various decision-marking matters connected to dispatch scheduling procedure. Because these affect the market participants' profit, the dispatch scheduling procedure should be reasonable. In this paper, we propose a constrained Pre-dispatch algorithm with considered security using sensitivity indices.

량에 대한 정보를 입찰하고 판매사업자는 구매의향을 가진 전력량과 감분비용을 입찰하게 된다. 발전사업자의 입찰에서는 발전기의 발전 입찰비용이 저렴한 발전기로부터 비싼 발전기 순으로 발전량을 누적하여 공급우선순위가 결정된다. 마찬가지로 판매사업자에 대해서는 자의 지불수준이 높은 판매사업자로부터 낮은 판매사업자순으로 구매량을 누적하여 구매우선순위가 결정된다. 비계약 선행급전을 통해 매시간대별 계통 및 모선별 유효전력 수요량과 발전기 유효전력 출력수준, 예상 시장정산 물량/가격이 결정된다.

1. 서 론

Post-contingency corrective rescheduling 문제를 포함한 안전도 제약 급전은 상정사고가 발생한 이후의 계통의 corrective capacity를 고려하기 때문에 안전도 제약 최적급전 문제의 일반식이 된다. 특히, 효율적인 전력시장 운영을 위해서는 급전과정 및 시스템과 관련된 연구가 필수적이며, 급전알고리즘 및 관련 제약(안전도 및 안전도 제약)에 대한 체계적인 연구를 통하여 전력산업의 효율성은 상당히 제고될 수 있다. 기존의 수직통합적 환경에서와는 달리 급전에 관련된 제반 의사결정 사항이 시장참여자(즉, 발전사업자, 판매사업자, 소비자 등)의 손익과도 직접 관련이 되므로 합리적이고 체계적인 급전의 사결정만이 시장참여자들을 납득시킬 수 있으므로 이러한 연구는 사전에 분쟁을 방지한다는 차원에서 필수적인 연구 분야이다. 이를 위해, 본 연구에서는 도매전력시장에서의 급전계획 수립 시 적용가능한 비계약 및 제약 선행 급전계획 알고리즘을 제안하였으며, 민감도 계수를 이용한 contingency screening을 통해 post-contingency analysis를 수행한다. Post-contingency analysis를 고려할 경우 다음과 같은 사항을 확인할 수 있다. :

(a) 대부분의 post-contingency 시나리오는 중속적인 violation을 다룬다. 즉, 많은 사례 가운데 최악의 violation을 제거하게 되면 다른 violation도 또한 제거될 수 있다.

2. 우리나라 도매전력시장에서의 급전계획

2.1 비계약 선행급전계획

급전계획이란 거래일의 전력수요를 충당하기 위해 사전에 거래일 매 시간대별 발전기들의 운전출력을 결정하는 것을 의미한다[1]. 비계약 선행급전계획은 전력계통에서 송전제한, 연료제한, 열용량 제약 등의 계통운영과 관련된 제약사항이 발생하지 않는다는 조건하에서의 발전 계획 즉, 이상적인 조건하에서의 경제 순위에 의한 발전계획을 의미한다. 이러한 비계약 선행급전계획은 다음과 같이 수행된다. 발전사업자는 발전기의 증분비용과 발전

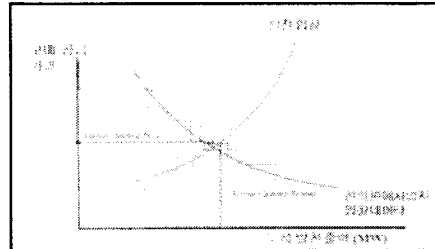


그림 1 비계약 선행급전계획에서의 시장가격 결정

2.2 제약 선행급전계획

제약 선행급전계획은 거래일에 실제 전력계통을 운영하기 위한 발전계획이다. 비계약 선행급전계획이 계통의 제약사항이 없이 이상적인 조건에서 단순히 경제원리에 의해 운전되는 것을 전제로 수립되는데 반해, 제약 선행급전계획은 계통운영에 반영해야하는 각종 제약조건들을 고려한 상태에서 실제로 계통운영의 결과를 예측한다. 비계약 선행급전계획의 결과로 주어진 각 발전기의 계통 투입 조합을 바탕으로, 제약 선행급전계획은 거래일의 매 시간대별 최적조류계산(OPF)에 의해 수립된다[2]. 이는 다음과 같은 비선형계획(NLP) 최적화 문제로 정식화된다.

$$\begin{aligned} \min F(x) & \quad (1) \\ \text{s.t } g(x) &= 0 & (2) \\ h(x) &\leq 0 & (3) \end{aligned}$$

여기서, $F(x)$ 는 모든 발전기의 발전비용에 대한 합으로 정의되며, 총 유효전력 발전비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 식(2)은 계통 수급균형 제약조건으로 각 모선에 대한 전력조류방정식으로 정의된다. 또한 식(3)은 계통 제어변수 x 및 함수 값에 대한 허용한계를 설정하는 부등제약조건을 의미한다.

3. Contingency Screening

일반적으로 특정 시간대에서의 계통신뢰도를 평가하기 위해서는 모든 상정사고를 연속적으로 시험한다. 그러나

실제 송전계통에서는 단일 선로고장이 사고의 대부분을 차지하므로 본 논문에서는 단일 선로고장(N-1 상정사고)에 대한 민감도를 고려한다.

3.1 선로의 민감도 계산

각 선로의 고장이 다른 선로에 미치는 영향을 판단하기 위해 다음과 같은 민감도 계수를 정의한다.

$$S_{i,k} = \frac{|f_i^k|}{|f_i^0|} - 1, \quad |f_i^k| > |f_i^0| \quad (4)$$

$$= 0, \quad |f_i^k| < |f_i^0|$$

여기서, f_i^0 : 정상상태에서의 선로 i 의 선로조류량

f_i^k : 선로 k 고장시 선로 i 의 선로조류량

이 민감도 계수는 LODF(Line Outage Distribution Factor)와 유사하나, 그 의미에 있어서는 약간의 차이가 있다. LODF[3]는 고장선로에 흐르던 선로조류량을 나머지 선로들이 어느 정도 부담하는가를 보여주는 반면, 위의 계수는 특정 선로가 다른 선로들의 개별적인 고장에 대해 어느 정도의 영향을 받는가, 다시말해 각 선로의 고장으로 인해 특정 선로의 선로조류량이 정상상태에서의 선로조류량과 비교하여 어느 정도 변하는가를 보여주는 것이다[4].

또한, 위의 민감도 계수는 N-1 상정사고 적용시, 특정 선로의 선로조류량이 정상상태에서의 선로조류량보다 증가한 경우에 대해서만 고려하였다. 이는, 정상상태일 때 보다 감소한 선로조류량은 계통안정도에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였기 때문이다.

4. Post-contingency analysis

Post-contingency analysis은 민감도 분석을 통해 결정된 선로(가장 violation 심한 선로)에 대해 상정사고를 적용하여 계통의 운영여부를 확인한다. 이 방법은 나머지 제외하고 단지 post-contingency violation이 가장 심한 것만을 고려하는 것이다. 이 부분에 대한 정식화는 다음과 같이 기술될 수 있다[5].

$$\text{Min } F = \sum_i d^i \cdot \alpha_i \quad (5)$$

$$\text{s.t } Ax_i \leq b_i \quad (6)$$

$$|PF_i - \alpha| \leq TL^{\text{max}} \text{ for the worst } i\text{th violation} \quad (7)$$

$$|x_0 - x_i| \leq \Delta \quad (8)$$

여기서, 식(6)은 상정사고 후 powerflow 등식 및 부등제약식이며, 식(7)은 가장 violation이 심한 선로를 제외하고 나머지 선로들에 대한 제약식이다. 식(8)은 결합제약으로서 발전기 증감발제약이다. 만약 식(5)-(8)을 계산한 후, α 이 양의 값을 갖는다면, post-contingency 시나리오는 실행가능하게 된다.

5. 안전도를 고려한 제약선행급전 알고리즘 구현

◆ Step 1 : 발전 및 수요입찰 데이터 입력

매 시간대별로 발전입찰 데이터는 발전기의 증분비용과 발전량에 대한 정보를, 수요입찰 데이터는 구매의향을 가진 전력량과 감분비용을 포함한다.

◆ Step 2 : 비제약 선행급전

발전 및 수요입찰 데이터를 가지고, 매 시간대별 비제약 선행급전계획을 수행한다. 이 때 도출되는 결과는 다음과 같다.

- 매 시간대별 계통 및 모선별 유효전력 수요량

- 매 시간대별 각 발전기의 유효전력 출력수준
- 예상 시장 청산물량 및 청산 가격

◆ Step 3 : 제약 선행급전계획

비제약 선행급전계획을 통해 계통투입이 결정된 발전기와 부하를 바탕으로 거래일 매 시간대별 제약 선행급전계획을 수행한다. 이 때 도출되는 결과는 다음과 같다.

- 매 시간대별 각 모선의 유효 및 무효전력 부하량
- 매 시간대별 각 발전기의 유효 및 무효전력 발전량
- 매 시간대별 각 발전기의 연료비용
- 매 시간대별 유효 및 무효 선로조류량
- 매 시간대별 각 모선의 전압 및 위상각
- 매 시간대별 총 계통 운전비용

◆ Step 4 : Contingency Screening

민감도계수를 이용하여 N-1상정사고 적용시 계통신뢰도에 영향을 가장 많이 끼치는 선로를 Screening한다.

◆ Step 5 : Post-contingency analysis

Contingency Screening을 통해 결정된 선로에 대해 N-1상정사고를 적용하여 계통의 운영여부를 확인한다.

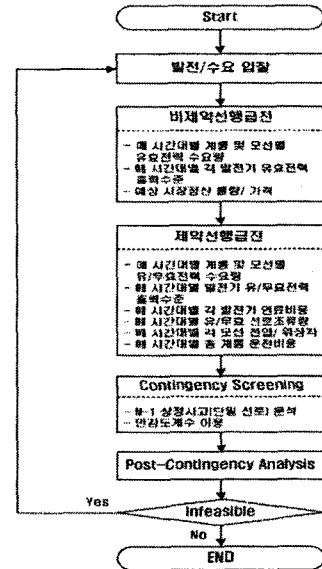


그림 2 안전도를 고려한 제약선행급전 알고리즘

6. 사례연구

안전도를 고려한 제약선행급전 알고리즘 타당성 여부를 입증하기 위해 <그림 3>의 6모선 모의 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다. 모의계통은 발전기 4대와 5개의 부하 그리고 9개의 송전선로로 구성되어 있다.

비제약 선행급전계획을 통해 도출된 예상 시장청산물량 및 가격은 <표 1>과 같다. <표 2>는 비제약 선행급전계획에 의해 결정된 각 모선의 부하량으로서 본 연구에서는 시간대별 부하중 피크부하와 중부하, 경부하 시간대만을 고려하였다.

표 1 예상 시장청산물량 및 가격 결과

급전주기	시장청산물량 (MW)	시장청산가격 (#/MWh)
경부하(01H)	2200	20.184
중부하(13H)	3100	30.614
피크부하(15H)	4000	41.209

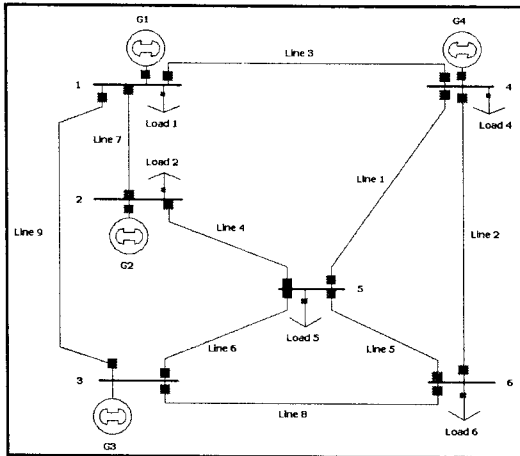


그림 3 6모선 모의계통

표 2 급전주기별 각 모선의 부하수요량

급전주기	Load1	Load2	Load4	Load5	Load6	Total
경부하(01H)	550	275	440	660	275	2200
중부하(13H)	774	388	620	930	388	3100
피크부하(15H)	1000	500	800	1200	500	4000

<표 3>은 비계약 선행급전결과를 바탕으로 제약 선행급전을 수행한 결과로서 선로조류량 및 발전량을 나타내고 있다.

표 3 제약선행급전계획에 의한 선로조류량 및 발전량

선 로	부 하	15H(MW)	13H(MW)	01H(MW)
Line 1		548.48	403.84	264.17
Line 2		32.1	21.56	12.19
Line 3		3.05	-22.94	-45.92
Line 4		-76.92	-74.68	-72.19
Line 5		-36.82	-29.09	-20.73
Line 6		-542.58	-424.97	-304.02
Line 7		439.15	285.67	151.96
Line 8		-506.27	-396.41	-283.95
Line 9		-59.56	-12.13	32.58

발전기	부 하	15H(MW)	13H(MW)	01H(MW)
G1		500.00	500.00	477.21
G2		1017.17	749.31	500.00
G3		1148.96	857.05	567.09
G4		1383.62	1022.46	670.44

<표 4>는 제약 선행급전결과를 가지고 각 시간대별 민감도 계수를 계산한 결과를 나타낸 것이다.

표 4 각 시간대별 민감도 계수 결과

구 분	교광선로(15H)								
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Line 9
Line 1	-	0.052	0.005	0.065	0.023	0.573	-0.353	-0.495	0.040
Line 2	10.414	-	0.012	-0.087	-0.358	4.701	0.134	10.517	-0.352
Line 3	70.246	1.230	-	8.836	-0.410	30.410	62.016	19.590	10.902
Line 4	1.196	-0.013	-0.016	-	-0.019	1.179	4.943	0.301	-0.345
Line 5	2.634	-0.104	-0.009	0.138	-	4.038	-0.538	4.451	0.119
Line 6	0.654	-0.041	-0.001	0.069	0.043	-	0.307	0.896	0.082
Line 7	-0.224	0.002	0.003	0.178	-0.004	0.218	-	-0.055	0.062
Line 8	-0.417	0.054	-0.001	0.016	-0.051	0.763	-0.048	-	-0.032
Line 9	-0.229	-0.075	0.036	-0.738	0.051	3.295	4.311	1.530	-

구 분	교광선로(13H)								
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Line 9
Line 1	-	0.480	0.349	0.533	0.449	1.251	-0.029	0.283	0.399
Line 2	11.579	-	-0.202	-0.123	0.429	5.739	0.252	11.361	-0.109
Line 3	4.719	0.111	-	-1.371	0.037	3.154	3.268	1.999	-0.285
Line 4	0.922	-0.010	0.110	-	0.015	0.930	3.510	0.223	-0.075

Line 5	2.503	-0.068	0.024	0.176	-	4.191	-0.529	4.029	0.031
Line 6	0.611	-0.037	0.023	0.085	0.043	-	-0.284	0.841	0.021
Line 7	-0.254	0.002	-0.030	0.265	-0.004	-0.254	-	-0.061	0.020
Line 8	-0.411	0.048	0.013	0.020	-0.050	0.761	-0.053	-	-0.009
Line 9	4.433	-0.258	-0.810	1.547	0.187	12.108	13.699	5.290	-

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Line 9
Line 1	-	0.041	-0.141	0.123	0.028	0.633	-0.253	-0.526	0.044
Line 2	13.561	-	-0.705	0.212	0.565	7.712	0.304	13.938	0.477
Line 3	0.152	-0.033	-	0.653	0.010	1.062	-0.623	0.672	0.381
Line 4	0.630	-0.007	0.231	-	0.011	0.676	1.993	0.159	0.195
Line 5	2.333	-0.021	0.081	0.245	-	4.864	-0.436	3.964	-0.122
Line 6	0.556	-0.031	0.062	0.115	0.042	-	-0.224	0.825	-0.076
Line 7	-0.312	0.003	-0.114	0.481	-0.006	-0.333	-	-0.079	-0.096
Line 8	-0.392	0.041	0.036	0.027	-0.049	0.758	-0.045	-	-0.029
Line 9	1.572	0.059	0.894	1.287	-0.045	1.103	0.707	-0.656	-

민감도 계수 계산 결과 피크부하시 Line 8번과 경부하 및 중부하시 Line 6번이 상정사고시 가장 violation 심한 것으로 나타났다. violation 심한 선로에 대해 상정사고를 적용시 제약급전을 결과를 <표 5>에 정리하였다.

표 5 안전도를 고려한 제약선행급전계획에 의한 발전기 출력 수준 비교

부 하	15H(MW)	13H(MW)	01H(MW)
모선번호 (증감발용량)			
1(30)	470.00	500.00	462.86
2(90)	978.83	768.45	500.00
3(100)	1057.36	826.14	530.76
4(90)	1500.00	1083.73	743.57

위의 결과를 보면 13H 및 01H때에는 violation이 심한 선로 6에 상정사고를 적용시에도 발전기 증감발 제약에 의해 발전기 출력을 재조정하였다. 그러나 15H에서는 violation이 심한 선로 8에 상정사고 적용시 G4 발전기가 증감발 제약을 위반하여 모선전압 제약을 만족시키지 못하여 계통이 infeasible한 결과를 나타냈다.

7. 결 론

경제적 전력시장 도입으로 인해, 다양한 전력거래를 보장하기 위한 선행급전에 대한 정보의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 또한 안정적인 전력계통 운영을 위해서 급전계획 시 안전도 제약조건인 영향을 고려해야 한다. 본 연구에서는 민감도 계수를 통한 선로 screening을 이용하여 상정사고 분석을 하였다. 분석 결과를 가지고 상정사고 시 계통 운영가능 여부에 대한 합리적 입찰정보를 발전사업자들에 줌으로서, 계통의 안정적 운영을 가능하게 한다.

향후연구에서는 15H 부하와 같이 계통운용이 불가능할 경우 판매사업자들의 경제성과 계통 운용을 위한 추가 정보를 제공하기 위한 모형을 구현하고자 한다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력거래소, 전력시장의 운영, <http://www.kpx.or.kr>
- [2] 김발호, "최적조류계산의 이론과 응용", 홍익대학교, 2001
- [3] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and control" 2nd Edition, Wiley-Interscience publication, pp. 411-452, 1996
- [4] 정구형, "송전계통의 신뢰도 비용 배분 방안에 대한 연구", KIEE, Vol 51A No 4, 2002
- [5] O. R. Saavedra, "Relaxed approach for the parallel solution of security-constrained dispatch with post-contingency rescheduling", IEEE Transaction on Power Systems, Vol 150, Issue 3, pp 291 - 296, 2003