

경쟁적 전력시장에서 송전선로 상정사고를 고려한 선행급전 알고리즘 개선에 관한 연구

김광모, 신혜경, 강동주*, 한석만, 정구형, 김발호
 홍익대학교, *한국전기연구원

A Study on an Improving Contingency Constrained Pre-Dispatch Algorithm in a Competitive Electricity Market

Kwang-Mo Kim, Hye Kyeong Shin, Dong-Ju Kang*, Seok-Man Han, Koo-Hyung Chung, Balho H. Kim
 Hong-Ik University, *KERI

Abstract - Systematic studies on the dispatch scheduling algorithm and related constraints can enhance the effectiveness of electricity market operation. When System Operator (SO) establishes a dispatch schedule, the bid information should be preserved in the schedule as much as possible.

In this paper, we introduce a new type of sensitivity factor called Line Outage Impact Factor (LOIF) to screen a transmission line causing the most severe outage when scheduling the dispatch. This screening can assure the stable system operation and make an efficient feedback between the SO and market participants. We propose a transmission line contingency constrained Pre-dispatch algorithm using sensitivity indices in a suitable Pre-dispatch scheduling. The proposed algorithm has been tested on sample system and the results show more secure operation against critical contingencies.

1. 서 론

본 논문에서는 도매전력시장에서의 급전계획 수립 시 적용가능한 비계약 및 제약 선행 급전계획 알고리즘을 제안하였으며, 급전계획에 적용 가능한 민감도계수를 이용한 계통에 심각한 영향을 미치는 선로를 선별하고, 선별된 결과를 가지고 상정사고 적용시 계통 운영가능 여부 및 합리적 입찰정보를 발전사업자들에게 줌으로써 계통의 안정적 운영뿐만 아니라, System Operator(SO : 계통운영자)와 입찰자간의 정확한 입찰정보를 제공함으로써 효율적인 피드백을 형성한다. 또한 전력시장의 원활한 경쟁체제 구축을 위하여 송전선로 상정사고 발생 시에도 계통의 안전도를 보장할 수 있는 급전계획 알고리즘을 제안한다. 사례연구에서는 6보선 사례계통을 적용하여 본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하였다[1].

2. 본 론

2.1 상정사고 심사(Contingency Screening)

2.1.1 급전계획에 적용 가능한 상정사고 심사 방법의 제안

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. 또한, 본 논문에서 제안하고 있는 급전알고리즘에 맞는 선로고장영향계수(Line Outage Impact Factor, LOIF)를 이용하여, 각 선로의 고장이 다른 선로에 미치는 영향을 판단하기 위해 다음과 같은 민감도계수를 정의한다[2].

$$S_{i,k} = \frac{|f_i^k|}{|f_i^0|} - 1, \quad |f_i^k| > |f_i^0| \quad (2-1)$$

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

범례, f_i^0 : 정상상태에서의 선로 l 의 선로조류량
 f_i^k : 선로 k 고장시 선로 l 의 선로조류량

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. 위의 민감도계수는 N-1 상정사고 적용시, 특정선로의 선로조류량이 정상상태에서의 선로조류량보다 증가한 경우에 대해서만 고려하였다. 이는, 정상상태일 때보다 감소한 선로조류량은 계통안정도에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였기 때문이다.

2.2 선로 상정사고를 고려한 제약 선행급전 알고리즘

2.2.1 선로 상정사고를 고려한 제약 선행급전 알고리즘의 구현

본 논문에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 비계약 및 제약 선행급전계획 모형을 구현하였으며, [그림 1]은 제안한 선행급전계획 모형의 운영에 대한 전체적인 알고리즘 보여주고 있으며, 다음과 같은 절차로 운영된다.

■ Step 1 : 발전 및 수요입찰 데이터 입력
 비계약 선행급전계획을 수행하기 위해 본 모형은 발전 및 수요입찰 데이터를 입력한다. 또한 매 시간대별로 발전입찰 데이터는 발전기의 증분비용과 발전량에 대한 정보를, 수요입찰 데이터는 구매의향을 가진 전력량과 감분비용을 포함한다.

■ Step 2 : 비계약 선행급전계획
 발전 및 수요입찰 데이터를 바탕으로 앞에서 설명한 바와 같이 거래일 매 시간대별로 계통운영과 관련된 제약사항이 발생하지 않는다는 조건 하에서 급전을 실시한다.

■ Step 3 : 제약 선행급전계획
 비계약 선행급전계획을 통해 계통투입이 결정된 발전기와 부하를 바탕으로 거래일 매 시간대별 계통운영에 반영해야하는 각종 제약조건들을 고려한 상태에서 실제 계통운영의 결과를 예측한다.

■ Step 4 : Contingency Screening
 상정사고 심사는 앞에서 설명한 민감도계수를 이용하여 계통에 가장 심각한 영향을 주는 선로를 선별하며, 선별기준은 다음과 같다.

- ① 선로 상정사고 시 과부하 선로를 가장 많이 발생시키는 선로
- ② 선로 상정사고 시 선로조류량을 가장 많이 증가시키는 선로

■ Step 5 : Post-Contingency Analysis
 Post-Contingency 분석은 민감도 분석을 통해 결정된 선로(계통에 가장 심각한 영향을 미치는 선로)에 대해 상정사고를 적용하여 계통의 운영여부를 확인한다. 이 방법은 나머지는 제외하고 단지 Post-Contingency 수정위배가 가장 심한 것만을 고려하는 것이다. 또한 post-contingency 수정 가능한 재급전문제를 포함한 안전도 제약급전은 상정사고가 발생한 이후의 계통의 재급전 가능용량을 고려하기 때문에 안전도 제약급전 문제의 일반식이 된다. 수정가능한 용량이 포함될 경우, 각 post-contingency 시나리오는 최적화 문제로 모형화된다.

Post-contingency 분석은 민감도 분석을 통해 결정된 선로에 대해 상정사고를 적용하여 계통의 운영여부를 확인하고, 상정사고로 인해 계통운영이 불가능할 경우 입찰자에게 효율적인 정보를 제공하기 위한 것이며, 정식화는 다음과 같다[3-4].

$$\text{Min } F = \sum_i d^i \cdot \alpha_k \quad (2-2)$$

$$s \cdot t$$

$$P_{Gk}^k - P_{Dk}^k - V_i^k \sum_{j=1}^N V_j^k (G_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k + B_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k) = 0 \quad \text{for } k = 1, \dots, N_C \quad (2-3)$$

$$Q_{Gk}^k - Q_{Dk}^k - V_i^k \sum_{j=1}^N V_j^k (G_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k - B_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k) = 0 \quad \text{for } k = 1, \dots, N_C \quad (2-4)$$

$$P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk}^k \leq P_{Gk}^{\max} \quad \text{for } k = 1, \dots, N_C \quad (2-5)$$

$$Q_{Gk}^{\min} \leq Q_{Gk}^k \leq Q_{Gk}^{\max} \quad \text{for } k = 1, \dots, N_C \quad (2-6)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i^k \leq V_i^{\max} \quad \text{for } k = 1, \dots, N_C \quad (2-7)$$

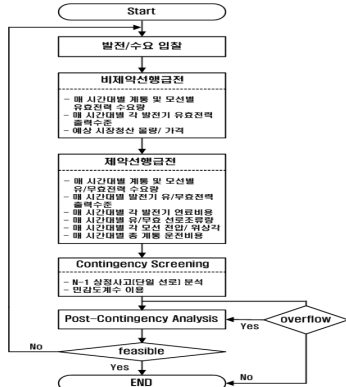
$$|PF_k| \leq TL^{\max} \quad (2-8)$$

$$|x_0 - x_k| + \alpha_k \leq \Delta \quad (2-9)$$

범례, N_C : 총 발전기의 수, d^T : 패널티 파라미터
 α_k : 슬랙변수, x_0, x_k : 상정사고 전·후 발전량
 Δ : 발전기 증감발량, k : 상정사고 지시번호

i, j	모선번호
P_{Gi}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 의 유효전력 발전량
Q_{Gi}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 의 무효전력 발전량
P_{Di}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 의 유효전력 부하량
Q_{Di}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 의 무효전력 부하량
V_i^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 의 전압크기
θ_{ij}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 와 j 간 전압위상각의 차
G_{ij}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 와 j 를 연결하는 송전선로의 컨덕턴스
B_{ij}^k	k 번째 상정사고 시 모선 i 와 j 를 연결하는 송전선로의 세퍼턴스
PF_k	k 번째 상정사고 시 선로조류량
TL_{max}	k 번째 상정사고 시 선로용량계약

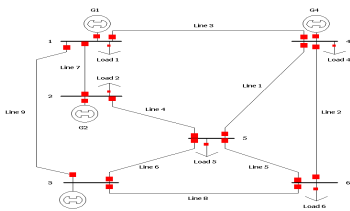
여기서, F 는 목적함수, d^T 는 α_k 에 대한 승수로서 페널티 파라미터로서 상수이며, α_k 는 k 번째 상정사고 적용시 제어변수 집합 가운데 제약조건을 위반한 정도를 측정하는 슬랙변수를 나타낸다. 또한 식(2-3)~(2-7)은 상정사고 후 전력조류 등식/부등식제약으로서 상정사고 후 각 모선에 대한 전력조류방정식으로서 k 번째 상정사고 하에서의 각각의 계통 제어변수 및 함수값에 대한 허용한계를 설정한다. 식 (2-8)은 민감도계수를 통해 선별된 선로를 제외한 나머지 선로들에 대한 선로용량 제약식이다. 식(2-9)은 결합제약조건(coupling constraints)으로서 k 번째 상정사고가 발생할 경우에도 계통운영이 가능하도록 보장하기 위해 각각의 제어변수가 변동할 수 있는 허용한계를 설정한다. 이러한 결합 제약조건은 주로 발전기의 용동능력을 고려하기 위해 정의된다. 그 결과, k 번째 상정사고가 발생하게 되면, 발전기는 주어진 증/감발 한계 내에서 출력을 재조정하게 된다. 만약 식(2-9)의 α_k 를 계산한 후, 위 문제의 목적함수 값이 0이 되면 k 번째 상정사고가 발생하더라도 발전기의 제발전 용량이 안정된 계통운전을 보장할 만큼 충분하다는 것을 의미한다. 그러나, 만약 목적함수 값이 0보다 크게 되면, k 번째 선로 상정사고 시 현재 발전기로는 계통운영이 불가능하게 된다는 것을 의미한다. 또한 'Must Feasible'을 유도하기 위해 SO가 제발전 용량에 대한 정보를 시장참여자에게게줌으로서 계통의 안정적 운영을 유도하는 가상발전기 역할과 효율적인 피드백을 형성한다. 그 반대의 경우에는 상정사고 스크리닝을 통해 도출된 위배가 가장 심한 선로가 탈락되더라도 계통운영에는 아무런 문제가 없다는 것을 의미한다[5].



[그림 1] 선로 상정사고를 고려한 제약선형계획 알고리즘

2.3 사례연구

2.3.1 개요 및 입력자료



[그림 2] 6모선 사례연구 계통

구분	발전용량(MW)		발전기 비용함수			감발용(MW)
	최대	최소	a	b	c	
G1	500.00	100.00	556.000	7.5870	21.1	30
G2	1500.00	500.00	720.000	7.6200	20.5	90
G3	1800.00	500.00	650.000	7.5190	17.8	100
G4	1500.00	500.00	450.000	7.8360	15.4	90

[표 1] 발전자료

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

[표 2] 수요자료

제약선형계획 결과에서 도출된 선로를 가지고 N-1상정사고 적용시에 선로들의 민감도를 계산한다. 상정사고 심사는 앞서서도 언급했듯이 상정사고 적용시 계통에 가장 심각한 영향을 미치는 선로를 선별하기 위한 작업으로서 계통 안전도 반영에 그 목적이 있다. 각 선로에 대해 N-1상정사고 적용시 민감도계수를 계산해보면, 최대부하시 선로 8과 중부하시 선로 6이 상정사고시 계통에 심각한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 경부하시의 상정사고가 발생하더라도 계통운영에는 아무런 문제가 발생하지 않았다. 상정사고 심사를 통해 선로를 선별한 다음, 이 선로가 탈락되었다는 가정하에 송전선로 상정사고 적용시 안전도 제약을 고려한 제약선형계획을 재실시한다.

모선번호(증감발용량)	부하		01시(MW)		13시(MW)		15시(MW)	
	구분	초기입찰	최종입찰	초기입찰	최종입찰	초기입찰	최종입찰	
G1(30)		477.21	477.21	500.00	500.00	500.00	500.00	
G2(90)		500.00	500.00	749.31	768.45	1017.17	1068.83	
G3(100)		567.09	567.09	857.05	826.14	1148.96	1232.87	
G4(90)		670.44	670.44	1022.46	1083.73	1383.62	1297.42	

[표 3] 선로 상정사고를 고려한 제약선형계획

[표 3]은 상정사고를 고려한 제약선형계획 재실시 결과이다. 01시 경우에는 선로상정사고 시에도 과부하가 발생하지 않았기 때문에 초기입찰과 최종입찰 결과와 동일하며, 13시에는 선로 6이 탈락시에도 발전기 증감발을 통해 계통이 운영가능하도록 제발전을 하였지만, 최대부하인 15시 시간대에는 선로 8이 탈락될 경우 G4가 증감발 제약을 위반하여 발전기 출력을 재조정하도록 시장참여자들에게 입찰변경에 대한 정보를 제공하여 최종입찰을 결과가 도출되었다.

[표 4]은 본 논문에서 제안한 선로 상정사고를 고려한 급전계획과 안전도 제약 최적조류계산(CCOFP) 결과를 비교한 것이다.

모선번호(증감발용량)	부하		01시(MW)		13시(MW)		15시(MW)	
	구분	제안한 방법	CCOFP	제안한 방법	CCOFP	제안한 방법	CCOFP	
G1(30)		477.21	477.20	500.00	500.00	500.00	500.00	
G2(90)		500.00	500.00	768.45	766.90	1068.83	1072.80	
G3(100)		567.09	567.10	826.14	898.60	1232.87	1281.60	
G4(90)		670.44	670.44	1083.73	965.10	1297.42	1199.40	
운전비용 증감		-	-	-	-	-	-	

[표 4] 선로 상정사고를 고려한 선형계획과 CCOFP의 결과비교

기존에서 사용되는 방법은 민감도계수(LODF)를 계산하여 모든 선로에 대해 상정사고를 적용하여 계산속도면에서 취약하였지만, 본 논문에서 제안한 급전계획에 맞는 민감도계수를 이용하여 계통에 가장 심각한 영향을 미치는 선로만을 선택하여 계산 속도 향상 및 정확성 측면에서 많이 개선되었음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 선로 상정사고를 고려하기 위한 한 가지 방안으로 급전계획에 맞는 민감도계수를 이용하여 계통에 가장 많은 영향을 미치는 선로를 선별하여, 그 선로에 대해 N-1상정사고 적용시 계통의 운영여부를 확인하여 계통의 운영이 불가능할 경우 SO가 시장참여자에게 효율적인 정보를 제공하는 제약선형계획 알고리즘을 개선 및 보완하였다.

사례연구에서는 중부하 및 경부하시에는 가장 위배가 심한 선로에 N-1상정사고를 적용하여도 계통에 아무런 영향을 미치지 않았으며, 제발전이 가능하였지만, 최대부하시에는 계통의 운영이 불가능하였다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부에서 시행하는 BK21(2차)사업(과제명 : 신 에너지원 개발 및 전력시스템 연계기술 연구팀)의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] 이승훈, 김발호, 박종배, 전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구, 한국전력공사 전력산업구조조정실, 1999. 8
- [2] 김발호, "송전계통의 신뢰도 비용 배분 방안에 대한 연구", 대한전기학회 학술지 A, 51권 4호, 2005
- [3] E. Vaahedi, H. Magdy Zein El-Din "Considerations in Applying Optimal Power Flow to Power System Operation" IEEE Transactions on Power System, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [4] 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
- [5] E. Vaahedi, H. Magdy Zein El-Din "Considerations in Applying Optimal Power Flow to Power System Operation" IEEE Transactions on Power System, Vol. 4, No. 2, May 1989.