

## Contingency Constrained Optimal Power Flow에 관한 연구

정 상 현 · 신영균 · 정구형 · 김 발 호  
홍익대학교

### A Study on Contingency Constrained Optimal Power Flow Algorithm

Sang Houn Joung · Young Gyun Shin · Koo Hyung Chung · Balho Kim  
HONGIK UNIVERSITY

**Abstract** - This paper presents a contains contingency constrained Optimal Power Flow(CCOPF) algorithm. The proposed algorithm maintains the nodal voltage levels within the specified limits after contingency. A case study demonstrate the proposed algorithm with the IEEE-14RTS under N-1 contingency criterion.

**Keywords:** CCOPF, thermal limit, voltage stability, contingency

#### 1. 서 론

전력산업에 “경쟁(competition)”의 개념이 도입된 이후, 보다 효율적인 계통운용과 규제 완화된 전력시장의 진보를 위한 다양한 연구가 시도되고 있다. 이러한 구조개편된 전력시장에 있어서 계통운용의 효율성 확보, 합리적인 효율체계 확립 등을 위하여 경제급전과 전력조류계산을 동시에 수행할 수 있는 최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)의 필요성이 대두되고 있다. 지금까지 OPF 문제는 방대한 계산량 및 과도한 계산시간 등을 이유로 실시간으로 적용하기가 어려웠으나, 정보통신 및 컴퓨터 기술의 향상에 따라 실시간 적용이 가능하게 되었다. 이에 따라서 실질적인 계통운용의 수단으로 활용될 수 있는 OPF에 관한 연구가 시급하다 할 수 있다.

실질적인 계통운용에 있어서 경제성과 더불어 최우선으로 고려되어야 할 요소는 계통을 안정적으로 운용하는 것, 즉 계통안전도(System Security)를 유지하는 일이다.

본 연구에서는 이러한 계통안전도를 확보하기 위한 방안으로 N-1 선로 상정사고 기준을 적용하여 상정사고가 일어나더라도, 선로의 열용량한계(Thermal Limit) 및 부하모선의 전압허용한계를 만족하는 CCOPF에 관한 연구를 수행하였다[1, 2].

#### 2. 본 론

##### 2.1 개요

오늘날, 전력산업은 규제완화, 경쟁체제로의 이행을 위한 큰 변화를 겪고 있는 가운데 송전망 운용의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 구조개편 이후 이러한 송전망 운용에 있어서, 기존의 발전설비와 송전설비를 더욱 좁아진 여유로 운용하는 문제와 무효전력보상기 사용의 증가에 따른, 송전선로의 열용량 한계와 부하모선의 전압안정도 문제가 크게 부각될 것으로 예상된다[5, 6].

따라서, 실시간 계통감시를 통한 중요 설비의 상정사고를 고려하여 선로의 송전예비력 및 부하모선 전압안정도 여유를 확보할 수 있는 방안이 검토되어야 한다. 본 연구에서는 이를 위한 한 가지 방안으로 CCOPF에 대한 알고리즘에 대해 제안하고자 한다.

CCOPF란 상정사고를 고려한 최적조류계산으로서, 계통설비(발전설비 및 송배전설비)의 일부가 돌발적인 사고로 계통에서 탈락하더라도 일정기술기준을 만족하면서 계속 안정적으로 운전할 수 있도록 최적의 경제급전 계획을 수립하는 일이다.

##### 2.2 안전도(Security)

안전도란 송전선로 또는 예상하지 못한 계통설비 탈락과 같은 갑작스런 외란에 대해 전력계통이 얼마나 안정하게 운용될 수 있는가를 나타내는 척도로서, 본 연구에서는 선로 상정사고 전후의 송전선로 열용량 한계 및 부하모선의 전압허용한계를 최적조류계산에 반영하는 방안에 대한 연구를 수행하였다.

대부분의 전력계통은 선로 열용량 한계를 고려하여 일정 선로예비력을 가지고 운용하고 있다. 그러나 상정사고로 인하여 특정 선로의 전력조류가 선로용량을 초과하여 흐를 수 있으며, 이와 같은 상황에서는 계통의 연쇄적 붕괴를 가져올 수 있다. 전압허용한계는 계통안전도 및 전력품질 향상을 위한 신뢰도 기준으로, 계통급전계획 수립시 모선별 전압이 적정범위 내에 있도록 정하고 있다.

##### 2.3 CCOPF

상정사고를 고려한 최적조류계산의 정식화에 앞서 본 연구에서는 다음과 같은 두 가지 가정을 하고 있다. 첫째, 상정사고 전후 발전기모선의 전압차는 발전기 특성에 따라 특정 한계값 내에 있다. 둘째, 상정사고 후, 상정사고에 따른 유효전력 손실 증감분에 대해서 발전기 특성에 따라 발전기 유효전력 출력은 특정 범위 내에서 변화할 수 있다.

위의 두 가지 가정 하에서 CCOPF를 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min.} \quad & \text{Fuel Cost} \\
 \text{s.t.} \quad & P_{Gi0} - P_{Di} - P_{i0}(x_0) = 0 \quad (1) \\
 & Q_{Gi0} - Q_{Di} - Q_{i0}(x_0) = 0 \quad (2) \\
 & P_{Gik} - P_{Di} - P_{ik}(x_k) = 0 \quad (3) \\
 & Q_{Gik} - Q_{Di} - Q_{ik}(x_k) = 0 \quad (4) \\
 & |V_{Gi0} - V_{Gik}| \leq \epsilon_{Gik} \quad (5) \\
 & |P_{Gi0} - P_{Gik}| \leq \gamma_{Gi} \quad (6) \\
 & H_0 \leq 0 \quad (7) \\
 & H_k \leq 0 \quad (8)
 \end{aligned}$$

$k$  : 상정사고 지시번호 ( $k = 1, \dots, M$ )

$i$  : 모선번호 ( $i = 1, \dots, n$ )

$l$  : 선로번호 ( $l = 1, \dots, m$ )

- $P_{Gi0}, P_{Gik}$  : 상정사고 전후 발전기 유효전력 출력
- $Q_{Gi0}, Q_{Gik}$  : 상정사고 전후 발전기 무효전력 출력
- $P_{Di}, Q_{Di}$  : 상정사고 전후 유·무효전력 수요량
- $V_{Gi0}, V_{Gik}$  : 상정사고 전후 발전기 모선 전압
- $\epsilon_{Gik}$  : 상정사고 전후 발전기 특성에 따른 발전기 모선별 전압차
- $\gamma_{Gi}$  : 상정사고 전후 발전기 특성에 따른 발전기 모선별 유효전력 출력 변화량

목적함수는 발전기 연료비용을 최소화하는 것이고, 식 (1)~(4)는 상정사고 전후의 유효전력 및 무효전력에 대한 전력조류방정식을 나타낸다. 이 제약은 상정사고 전후에 있어서 계통의 전력조류방정식을 만족할 수 있는 급전계획 수립에 목적이 있다. 그리고 식 (5)는 첫 번째 가정을 수식화 한 것으로서, 상정사고가 발생했을 때 각 발전기별 기계적 특성에 따라 짧은 시간 내에 발전기 출력을 조정할 수 있는 범위에 따른 제약식이다. 식 (6)은 두 번째 가정을 수식화 한 것으로, 상정사고 후 발전기 특성에 따라서 변동가능한 전압범위에 따른 제약식이다. 식 (7),(8)은 상정사고 전후의 부등식 제약조건(발전기 유·무효전력 출력제약, 송전용량제약, 전압제약)으로서, 송전용량제약 및 전압제약을 다음과 같이 구체화 할 수 있다.

$$f_{i0} \leq f_i^{\max} \quad (9)$$

$$f_{ik} \leq f_i^{\max} \quad (10)$$

$$V_{i0}^{\min} \leq V_{i0} \leq V_{i0}^{\max} \quad (11)$$

$$V_{ik}^{\min} \leq V_{ik} \leq V_{ik}^{\max} \quad (12)$$

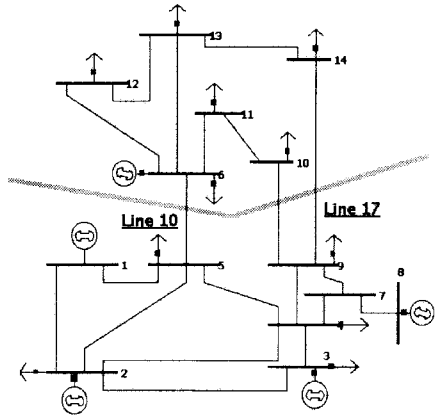
식 (9),(10)은 상정사고 전후에 따른 선로용량 제약으로서, 상정사고 전후 모든 선로의 전력조류가 열용량 한계 내에 있도록 하는 제약식이다. 식 (11), (12)는 상정사고 전후의 모선별 전압제약으로, 상정사고 전후 모든 모선의 전압이 전압허용한계 내에 있도록 하는 제약식이다.

본 연구에서는 전압제약에 있어 신뢰도 기준을 적용하여 상정사고 전후 모선전압이 전압허용한계(0.9~1.1pu) 내에 있도록 하였으나, 이는 계통운용 측면에서 과도한 운용기준이 될 수 있다. 따라서 향후, 전압안정도 측면에서 상정사고 후에도 안정할 수 있는 적절한 전압 한계값을 결정하는데에 관한 연구를 수행함으로써, 이를 식(12)에 적용하여 보다 경제적인 계통운용계획을 수립할 수 있다.

### 3. 사례연구

본 연구에서는 GAMS(CONOPT, MINOS5) 및 PowerWorld 프로그램을 이용하여 CCOPF를 구현 및 검증하였으며[7, 8], 사례연구는 다음의 (그림 3)과 같은 변형된 IEEE 14 RTS를 이용하여 수행하였다[3].

본 연구에서는 연계선로 10의 상정사고만을 대상으로 하였으며, 사례연구 계통의 선로, 발전기 및 부하 데이터는 각각 표 1, 2, 3과 같다. 선로 임피던스는 계통의 유효전력 손실이 없다는 가정 하에 j0.001로 동일하게 두었고, 상정사고 전후 모든 모선의 전압 하한값은 0.90pu, 상한값은 1.10pu로 가정하였다. 그리고 상정사고 전후의 발전기모선의 전압차,  $\epsilon$  는 0.001pu로 가정하였다.



(그림 1) The Modified IEEE 14 RTS

Line	From - To	Thermal Limit (MW)
1	1-2	250
2	1-5	250
3	2-3	150
4	2-4	200
5	2-5	200
6	3-4	150
7	4-5	150
8	4-7	300
9	4-9	200
10	5-6	300
11	6-11	250
12	6-12	200
13	6-13	200
14	7-8	250
15	7-9	150
16	9-10	200
17	9-14	150
18	10-11	200
19	12-13	150
20	13-14	200

표 1 Line Data

Gen. No.	Cost Coefficient		
	$a_i$	$b_i$	$c_i$
G1	0.0	5.0	0.3
G2	0.0	7.0	0.8
G3	0.0	10.0	0.9
G6	0.0	0.3	5.0
G8	0.0	0.3	5.0

표 2 Gen. Data

Bus No.	Load	
	P(MW)	Q(MVR)
2	12.00	5.80
3	14.00	5.40
4	11.00	-1.80
5	18.00	6.80
6	16.00	9.40
9	36.00	12.40
10	20.00	16.60
11	45.00	18.80
12	68.00	25.80
13	85.00	35.60
14	106.00	75.30

표 3 Bus Load Data

이러한 사례연구 계통을 이용해서 Base Case의 OPF에 따른 결과와 상정사고를 고려한 CCOPF의 결과를 비교하였다.

다음 표 4는 OPF와 CCOPF의 상정사고 전후에 따른 주요 선로의 전력조류를 나타내고 있다. 일반적인 OPF의 경우, 선로 10이 탈락하였을 때 선로 17의 조류는 선로용량을 초과하여 흐르게 된다. 이는 계통운용에 있어서 대단히 위험하다. CCOPF의 결과를 살펴보면 선로 10의 탈락하더라도 선로 17의 선로용량을 초과하지 않는 범위 내에서 전력조류가 흐르게 된다.

	OPF		CCOPF	
	Line 10	Line 17	Line 10	Line 17
Base Case (MW)	189.13	99.06	127.59	85.29
Line 10 off (MW)		193.20		150.00

표 4 상정사고 전후 OPF와 CCOPF의 전력조류

다음 표 5는 OPF와 CCOPF의 상정사고 전후에 따른 주요 부하모선의 전압을 나타내고 있다. OPF를 수행한 결과에 따라 계통을 운영한다고 가정하고, 선로 10에 대해 모의 상정사고를 수행하였을 때, 특정 부하모선의 전압값이 전압범위에서 벗어남을 볼 수 있다. 이러한 현상을 막기 위해 선로 10의 상정사고를 고려한 CCOPF를 수행한 결과 선로 10의 상정사고 전후 모든 부하모선의 전압값이 전압범위 내에 있다.

Bus No.	OPF		CCOPF	
	Base (pu)	Line10 off (pu)	Base(pu)	Line10 off (pu)
4	0.90607	0.84628	0.94728	0.91849
5	0.93565	0.87218	0.97978	0.93196
7	0.90318	0.84298	0.92801	0.90284
9	0.90614	0.80637	0.93946	0.90083
10	0.94549	0.85903	0.97473	0.94374
14	0.90183	0.81064	0.93260	0.90000

표 5 상정사고 전후 OPF와 CCOPF의 부하모선 전압

#### 4. 결 론

실질적인 전력계통 운용에 있어서 계통안전도를 고려하는 것은 계통의 경제적 운용과 더불어 필수적인 일이다. 본 연구에서는 상정사고를 고려한 최적조류계산(CCOPF)의 구현에 있어서, N-1 Contingency를 기준으로 하고 상정사고 전후에 선로의 열용량 한계 및 부하모선의 전압허용한계를 만족할 수 있는 CCOPF에 대한 알고리즘을 제안하고, 이를 검증하였다.

안전도 제약조건을 설정함에 있어 전압한계를 경제성을 고려하여 계통상황에 맞게 설정하는 것은 대단히 중요한 일이다. 향후, 경제성과 더불어 적절한 전압여유를 고려하여 적정 전압한계를 결정하는 알고리즘에 관한 연구가 필요하다 하겠다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여  
 기초전력공학공동연구소(02-전-01) 주관으로  
 수행된 과제임

#### [참 고 문 헌]

- [1] Young Kyun Shin, "An Implementatin of SCOPF Algorithm", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2000
- [2] Junji Kubokawa, "A Solution of Optimal Power Flow with Voltage Stability Constraints", Power System Technology, 2000. Proceeding. PowerCon 2000, Vol.2, pp.625-630, 2000
- [3] R. Billinton, "A reliability test system for educational purposes-basic data", IEEE Transactions on Power System, Vol.4, No.3, 1989
- [4] Roy Billinton, "Voltage stability considerations in composite power system reliability evaluation", IEEE Transactions on Power System, Vol.13, No.2, 1998
- [5] Thierry Van Cutsem, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998
- [6] Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, Inc. 1994
- [7] Richard E. Rosenthal, "GAMS A User's Guide", GAMS Development Corporation, 1998
- [8] "PowerWorld Simulator 9.0 User's Guide", PowerWorld Corporation