

비상시 선로혼잡 해결을 위한 직접부하제어

Direct Load Control Scheme for Congestion Problems in Power System Emergency

신호성* · 김병수* · 송경빈* · 김재철* · 이학주** · 권성철**

Ho Sung Shin · Byoung Su Kim · Kyung Bin Song · Jae Chul Kim · Hak Ju Lee · Seong Chul Kwon

송실대학교* · 한전전력연구원**

Abstract

Most of the electric power in the power system of South Korea is flowing from the south area to the north area, Seoul, in the capital of South Korea. Almost of the needs of the electric power in the capital area are about 43% of the total loads and generation plants are mainly located in the south area of South Korea. As mentioned the earlier characteristic, transmission congestion is one of the important research issues. Because of the limits of the power flows from the south to the north which are anticipated to be increased more and more in the future, these congestion situations may cause a serious voltage stability problem in emergency of the power system. Accordingly, we are interested in an interruptible load control program so as to solve this problem in emergency. This problem can be solved by an interruptible load management in emergency, however, the systematic and effective mechanism has not been presented yet. In this paper, the algorithm of interruptible load management plan using the line sensitivity to the loads for the transmission congestion management in emergency is presented. The proposed method is applied to 6-Bus sample system and their results are presented.

keywords: transmission congestion, congestion management, line sensitivity, direct load control algorithm

1. 서 론

송전 시스템을 설계시, 전력시스템의 안정성을 확보하기 위해 전력수요, 발전기의 다양한 운전점, 상정사고 등을 기본적으로 고려한다. 송전 시스템은 또한 예기치 않은 송전선로, 발전기, 변압기 등의 탈락사고 같은 경우에도 안정적으로 운영되어야 한다[1][2]. 이를 위해선, 충분한 송전용량의 확보가 필요하다. 하지만, 비용문제나 환경문제와 같은 제약이 따르고, 또한 송전용량은 열용량 제약이나 왜란으로 인하여 한계값을 가지게 된다. 전력수요와 공급을 이어주는 전력계통 송전 또는 배전선로는 전력을 수송하는데 설비의 종류, 계통구성 여건, 계절, 기온 등 여러 가지 조건에 따라 그 운전용량에 한계가 있다. 전력계통 운영시 송배전설비에 흐르는 전력수송량이 자체 용량한계 또는 안정 운영한계를 초과하거나 근접한 상태를 계통혼잡이라한다[3]. 현재의 전력시스템은 고 신뢰도와 고품질의 전력을 수용가들에게 공급하기를 지향하는데, 송전혼잡은 전력시스템에서 전압 불안정이나

주파수 불안정과 같은 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 송전 혼잡 문제는 여러 국가에서 주요 관심분야 중의 하나이다[4][5]. 송전 혼잡을 해결하는 방법에는 모선분리와 같은 계통구성 변경, 송전망 정수개선 등을 통한 전력계통의 특성을 개선하거나, 송전망의 보강 등으로 용량을 증대시키는 방법 등이 있고, 운영측면에서 발전기의 제약운전으로 해소하는 방법 등이 있다. 이전의 연구에서 선로민감도를 이용하여 발전기의 출력의 재분배를 통한 송전 혼잡을 해결하는 방법이 제안되었다[6]. 하지만 부하 차단 없이는 전력시스템을 정상적으로 운영할 수 없는 상황이 발생할 수도 있다. 특정한 상정사고는 전력시스템의 제약을 위반하여 계통을 불안정하게 할 것이다. 따라서, 본 논문에서 비상시 선로민감도를 이용한 직접부하제어 알고리즘을 제시한다. 제안한 알고리즘의 목적은 전력시스템의 주요한 고장에 대해 비상시 송전혼잡의 해결책을 제시하는 것이다. 알고리즘의 효율성을 보이기 위해 2개의 발전기, 5개의 부하, 8개의 송전선로를 포함하는 6모선 샘플 계통을 통해 테스트하였다.

2. 직접부하제어

2.1. 직접부하제어 알고리즘

본 논문에서 제안한 비상시 선로민감도를 이용한 직접부하제어 알고리즘은 차단 가능한 부하의 최소량을 계산할 수 있다. 제안한 방법의 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad \sum \Delta P_{Di} \quad (1) \\ & \text{subject to:} \\ & \quad \sum \Delta P_i = 0 \\ & \quad [S] \Delta P_i \leq \Delta L F \\ & \quad -[B] \Delta \theta = \Delta P_i \\ & \quad \Delta P_{Gi}^{\min} \leq \Delta P_{Gi} \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \\ & \quad 0 \leq \Delta P_{Di} \leq \Delta P_{Di}^{\max} \end{aligned}$$

여기서 ΔP_{Di} : 모선 i 에서 차단 가능한 부하량

$i \in I_D$, I_D 는 부하모선의 집합

ΔP_i : $\Delta P_i = \Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di}$

[S]: 선로민감도행렬

Congestion distribution Factor(CDF)

$\Delta L F$: 선로용량제약의 초과하는 양

[B]: Y_{bus} 의 서스셉턴스 행렬

ΔP_{Gi} : 모선 i 에서 발전기 출력의 변화량

$i \in I_G$, I_G 는 발전기모선의 집합

식(1)의 최적화 문제는 선형계획법이나 비선형계획법을 통해 도출할 수 있고, 그 해는 부하모선과 발전기 모선에서의 부하차단량과 발전기의 출력변화량을 제공한다. 수정된 운전점은 송전선로의 용량제약을 위반하지 않으며 모든 모선에서 전력방정식을 만족시킨다. 제안한 알고리즘은 기본적으로 전력시스템에서 사고가 발생시 적용된다. 제안한 알고리즘의 순서도는 그림 1과 같다.

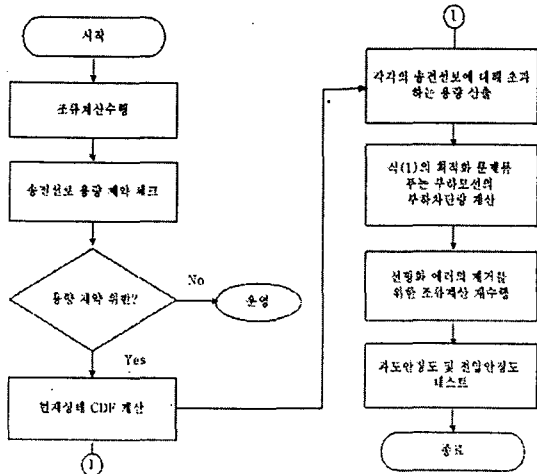


그림 1. 제안한 알고리즘의 순서도
Fig.1 Flowchart of the proposed algorithm

프로그램이 시작하면, 먼저 조류계산을 수행한다. 그 다음 관심 있는 송전선로에 대해 송전용량제약을 검사한다. 모든 송전선로가 제약을 위반하지 않는다면 현재상태가 유지된다. 그렇지 않으면, 사고시 전력시스템의 CDF를 계산한다. 다음 단계로, 송전선로에 대해 초과하는 선로조류의 양을 계산한 후, 초과하는 선로조류를 줄이기 위해, 식(1)의 최적화문제를 풀어 부하모선에서의 부하차단량을 산출한다. 조류계산의 재수행을 통해 선형화에러는 제거될 수 있다. 마지막 단계로, 과도안정도와 전압안정도를 검토한다. 이 때 전력시스템이 안정할 경우 제안한 알고리즘이 적용된다.

2.2. 선로민감도

선로민감도는 CDF(congestion distribution factor)로부터 유도된다[2]. 그 결과는 다음과 같다. 정의는 DC 조류 계산으로부터 출발하는데, 모선 $i-j$ 를 흐르는 전력에 대해서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$f^{(i,j)} = \frac{1}{x_{i,j}} (\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

위 식은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$F^{(i,j)} = [M^{(i,j)}]^T \{\delta\} \quad (3)$$

여기서 $F^{(i,j)}$ 는 선로 조류를 나타내는 벡터, $[M^{(i,j)}]^T$ 는 각 행의 i 번째 열과 j 번째 열에만 $\frac{1}{x_{i,j}}$ 와 $-\frac{1}{x_{i,j}}$ 값을 가지고 나머지는 모두 0 값을 가지는 행렬, $\{\delta\}$ 는 전압의 위상각을 나타내는 벡터다.

자세한 유도는 [2]의 부록에 설명된다. 최종적인 모선 i 와 j 에 대한 임의의 선로의 congestion distribution factors(CDF)는 다음과 같다.

$$\{D^{(i,j)}\} = \{D_n^{(i,j)}\} + \beta^{(i,j)} \{1\} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } \beta^{(i,j)} = -\frac{D_n^{(i,j)}(i) + D_n^{(i,j)}(j)}{2} \quad (6)$$

3. 사례연구

제안한 알고리즘은 2개의 발전기, 5개의 부하, 8개의 송전선로를 포함하는 6모선 샘플 계통을 통해 테스트하였다. 조류계산의 시뮬레이션을 위해서는 Power World Version 8.0을 이용하였다. 6모선 샘플 시스템의 계통도는 그림 2와 같다.

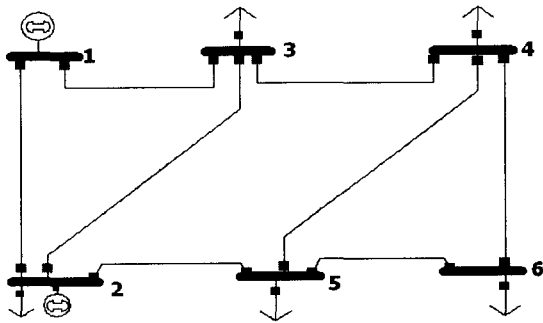


그림 2 샘플 시스템의 계통도
Fig.2 Configuration of the power system

6모선 샘플 계통에 대한 시스템 데이터는 표 1과 2와 같다.

표 1. 송전선로 데이터
Table 1. Transmission line data

Line Number	Between Buses	Line Impedance		Maximum MW Flow
		R per unit	X per unit	
1	1-2	0.02	0.06	-
2	1-3	0.08	0.24	-
3	2-3	0.06	0.18	100
4	2-5	0.002	0.10	-
5	3-4	0.01	0.03	120
6	4-5	0.02	0.04	50
7	4-6	0.08	0.24	-
8	5-6	0.003	0.10	-

표 2. 모선 및 부하 데이터
Table 2. Bus and load data

Bus Number	Voltage Magnitude	Load	
		Real (MW)	Reactive (Mvar)
1	1.06		
2	1.05	20	10
3	Not specified	45	15
4	Not specified	40	5
5	Not specified	60	10
6	Not specified	60	10

6모선 샘플 계통의 정상상태의 모선 전압과 선로 조류는 표 3과 4와 같다.

표 3. 정상상태 모선 전압
Table 3. Bus voltages in steady-state

Bus Number	Voltage Magnitude	Voltage Angle
1	1.060	0.00
2	1.050	-1.76
3	1.005	-6.53
4	1.002	-7.50
5	1.005	-7.52
6	0.993	-9.97

표 4. 정상상태 선로조류
Table 4. Line flows in steady-state

Line Number	Between Buses	Real Power	Reactive Power
1	1-2	61.53 MW	12.32 Mvar
2	1-3	53.55 MW	6.36 Mvar
3	2-3	50.11 MW	3.17 Mvar
4	2-5	105.07 MW	39.93 Mvar
5	3-4	55.15 Mw	-6.49 Mvar
6	4-5	-2.45 MW	-6.30 Mvar
7	4-6	17.30 MW	-4.09 Mvar
8	5-6	43.00 MW	11.81 Mvar

본 논문에서는 실제적인 선로조류의 한계값을 정할 수 없어, P_{23} , P_{34} , P_{45} 의 선로조류의 용량제약을 표 1의 값으로 가정하였다. 모선 2와 모선 5 사이의 송전선로 탈락의 사고는 계통에 큰 악영향을 끼치는 사고중의 하나이다. 이 경우의 조류계산 결과는 표 5와 6과 같다.

표 5. 모선 2와 5사이의 선로 탈락시 모선전압
Table 5. Bus voltages with the transmission line fault between bus 2 and 5

Bus Number	Voltage Magnitude	Voltage Angle
1	1.060	0.00
2	1.050	-0.79
3	0.878	-13.02
4	0.846	-16.57
5	0.815	-19.34
6	0.806	-22.09

표 6. 모선 2와 5사이의 선로 탈락시 선로조류
Table 6. Line flows with the transmission line fault between bus 2 and 5

Line Number	Between Buses	Real Power	Reactive Power
1	1-2	33.51 MW	20.97 Mvar
2	1-3	105.71 MW	52.18 Mvar
3	2-3	*128.20 MW	60.05 Mvar
4	2-5	0.00 MW	0.00 Mvar
5	3-4	*167.54 Mw	41.55 Mvar
6	4-5	*94.36 MW	22.29 Mvar
7	4-6	29.31 MW	4.13 Mvar
8	5-6	31.74 MW	7.04 Mvar

* 선로조류의 제약을 위반

두 개의 케이스가 제안한 알고리즘에 적용된다. 하나의 경우는 각각의 부하 모선에서 충분한 차단 가능한 부하의 용량이 있는 경우이고, 다른 하나는 제한된 차단 가능한 부하의 용량을 가진 경우이다.

사례연구 I: 충분한 차단 가능한 용량이 있는 경우

모선 2와 5사이의 송전선로의 탈락시, 송전선로 3, 5 그리고 6번이 제약을 위반한다. 제안한 알고리즘을 초과하는 선로조류를 줄이기 위해 적용시킨다. 식(1)의 최적화 문제의 해는 IMSL의 모듈중의 하나인 선형계획법(LP: linear programming)을 통해 도출하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

- 모선 5에서 50MW 부하삭감
- 모선 2에서 50MW 발전력 출력 감소

도출된 결과를 반영한 조류계산의 결과는 표 7에서의 결과와 같이 시스템의 선로조류는 각각 선로 제약보다 작음을 알 수 있다. 모선전압을 향상시키기 위해서, 무효전력의 제어를 할 수도 있다.

표 7. 제안한 알고리즘의 결과를 반영한 선로조류
Table 7. Line flows with proposed algorithm

Line Number	Between Buses	Real Power	Reactive Power
1	1-2	44.38 MW	17.55 Mvar
2	1-3	78.60 MW	27.24 Mvar
3	2-3	88.95 MW	28.50 Mvar
4	2-5	0.00 MW	0.00 Mvar
5	3-4	112.60 Mw	19.88 Mvar
6	4-5	47.74 MW	11.79 Mvar
7	4-6	23.39 MW	0.44 Mvar
8	5-6	37.18 MW	8.66 Mvar

사례연구 II: 제한된 차단 가능한 용량이 있는 경우

실제적으로 각 모선에서 차단 가능한 용량이 충분한 경우는 드물다. 그래서 제한된 차단 가능한 용량이 있는 시스템에 대해 테스트하였다. 본 논문에서, 부하모선에서의 차단 가능한 용량은 표 2의 유효전력의 50%로 가정하였다. 사례연구 I에서와 같은 방법으로 제안한 알고리즘을 초과하는 선로조류를 줄이기 위해 적용시킨다. 선형계획법을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

- 모선 5에서 30MW 부하삭감
- 모선 6에서 28MW 부하삭감
- 모선 2에서 50MW 발전력 출력 감소
- 모선 1에서 8MW 발전력 출력 감소

표 8에서 보듯이 사례연구 I과 마찬가지로 선로조류의 양이 선로 제약보다 작음을 알 수 있고 사례연구 I의 결과 보다는 부하모선에서의 차단 가능한 용량이 작기 때문에 총 부하차단량이 8 MW 정도 늘어났음을 살펴 볼 수 있다.

표 8. 제안한 알고리즘의 결과를 반영한 선로조류
Table 8. Line flows with proposed algorithm

Line Number	Between Buses	Real Power	Reactive Power
1	1-2	38.08 MW	19.52 Mvar
2	1-3	72.44 MW	22.68 Mvar
3	2-3	82.73 MW	22.32 Mvar
4	2-5	0.00 MW	0.00 Mvar
5	3-4	101.85 Mw	14.12 Mvar
6	4-5	46.41 MW	8.05 Mvar
7	4-6	14.29 MW	-0.58 Mvar
8	5-6	15.91 MW	2.05 Mvar

송전 혼잡문제를 해결하기 위해 사례연구 I과 사례연구 II에서 직접부하제어 알고리즘을 적용시켰다. 사례연구 II의 경우가 I보다는 실제 시스템에서는 적용가능성이 높을 것이다. 사례연구를 통해 알 수 있는 사실은 각 모선에서의 유입전력(injection power)의 변화, 다시 말해 부하삭감 또는 발전력 출력변화에 따라 각각의 송전선로의 선로조류의 변화에 미치는 영향은 어떤 모선에서 그 변화가 일어나느냐에 따라 달라진다.

4. 결론

본 논문에서는, 송전선로 탈락, 대용량의 발전기 탈락과 같은 사고로 인한 비상시 송전혼잡의 문제를 해결하기 위해 직접부하제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 부하차단 없이는 계통을 정상적으로 운영할 수 없는 상황의 경우에 적용될 수 있다. 제안한 방법을 통해서 선로 혼잡을 해결하기 위한 최소의 부하차단량의 산출이 가능하다. 제안한 알고리즘의 효율성을 증명하기 위해 2개의 발전기, 5개의 부하, 8개의 송전선로를 포함하는 6 모선 샘플 계통을 통해 테스트하였다. 사례연구의 결과는 특정한 송전선로 탈락의 경우 송전 혼잡을 해소하면서 계통을 정상적으로 운영할 수 있는 최소의 부하차단량을 산출할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 한국전력공사(과제번호:R-2004-0-071) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- (1)Christie R.D., Wollenberg B.F. and Wangenstein I, "Transmission Management in the Deregulated Environment", Proceedings of the IEEE, Vol.88, pp. 170-195, Feb. 2000.
- (2)Chien-Ning Yu and Ilic, M.D., "Congestion Clusters- Based Markets for Transmission Management", IEEE PES 1999 Winter Meeting, Vol. 2, pp. 821-832, 31 Jan. 4 Feb. 1999.
- (3) "www.kpx.or.kr", 전력거래 및 계통기술 용어사전.
- (4)R.S.Fang and A.K.David, "Transmission Congestion Management in an Electricity Market", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 14, pp. 877-883, Aug. 1999.
- (5)Harry Singh, Shangyou Dao and Alex Papalexopoulos, "Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets" IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, pp. 672-680, May 1998.
- (6)송경빈, 임규형, 백영식, "한전 실계통의 혼잡처리에 대한 적용사례", 전기학회 논문지., Vol. 50A, No. 12, p. 549-555, 2001, 12.