

경쟁적 전력시장에서 상정사고를 고려한 에너지와 주파수 제어예비력의 최적배분 기법

論 文
55A-5-5

Optimal Dispatch of Energy and Frequency Regulation Reserve Considering Contingency in a Competitive Electricity Market

李起松* · 鄭允源** · 朴宗培† · 愼重麟*** · 全瑩煥§
(Ki-Song Lee · Yun-Won Jeong · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin · Yeong-Han Chun)

Abstract - This paper presents a new approach for optimal dispatch of energy and frequency regulation reserve considering contingency in a competitive electricity market. It is necessary to introduce the reserve market with the spot energy market for operating efficiently and obtaining the security of the electricity market. However, the reserve market is closely connected with the energy market since the energy and reserve are produced from the same resources. Thus, it is inevitable to co-optimize the energy and ancillary service for efficient operation of energy and ancillary service market. Therefore, this paper proposes a new method for optimal dispatch of energy and frequency regulation reserve considering n-1 contingency of generator and transmission line using constraints and sensitivity based on AC power flow. To verify the effectiveness of the proposed method, the numerical studies have been performed for 5-bus sample system and modified IEEE 14-bus system.

Key Words : Optimal Dispatch, Frequency Regulation Reserve, Contingency, Ancillary Service

용어 체계

$C(\cdot)$ 에너지시장에 대한 선형 입찰함수
 $C^{UP}(\cdot)$ 주파수 제어증발예비력 공급에 대한 입찰함수
 $C^{DOWN}(\cdot)$ 주파수 제어감발예비력 공급에 대한 입찰함수
 q_g^{UP} 주파수 제어증발예비력 입찰가격 벡터
 q_g^{DOWN} 주파수 제어감발예비력 입찰가격 벡터
 P_g^{UP} 주파수 제어증발예비력 공급량 벡터
 P_g^{DOWN} 주파수 제어감발예비력 공급량 벡터
 P_g, Q_g 유·무효 발전량 벡터
 $\underline{P}_g, \bar{P}_g$ 발전출력 제약량 벡터
 P_g^C, Q_g^C 상정사고-C에 대한 유·무효 발전량 벡터
 $\underline{P}_g^C, \bar{P}_g^C$ 상정사고-C에 대한 발전출력 제약량
 P_f 선로조류량 벡터
 \bar{P}_f 최대 송전선로 제약량 벡터
 P_f^C 상정사고-C에 대한 선로조류량 벡터
 \bar{P}_f^C 상정사고-C에 대한 최대 송전선로 제약량

B DC 조류계산 행렬
 B^C 상정사고-C에 대한 DC 조류계산 행렬
 H DC 조류계산기반 선로조류함수 행렬
 H^C 상정사고-C에 대한 DC 조류계산기반 선로조류함수 행렬
 P_L, Q_L 유·무효 부하량 벡터
 $P_{ij}(\cdot)$ 선로-ij의 유효 선로조류 함수
 $Q_{ij}(\cdot)$ 선로-ij의 무효 선로조류 함수
 $P_{ij}^C(\cdot)$ 상정사고-C에 대한 선로-ij의 유효 선로조류함수
 $Q_{ij}^C(\cdot)$ 상정사고-C에 대한 선로-ij의 무효 선로조류함수
 Ω_i^G 모선-i에 연결된 발전기 집합
 V 모선별 전압크기 벡터
 \bar{V}, \underline{V} 모선별 전압크기의 최소·최대값 벡터
 θ 모선별 위상각 벡터
 n 전체 모선의 수
 n_g 전체 발전기의 수
 $\theta_{P_g^C}, \theta_{Q_g^C}$ 상정사고에 대한 선로-ij의 민감도 함수
 $a_{ij,k}^P, a_{ij,k}^Q$ 모선-k에 연결된 발전기의 상정사고에 대한 선로-ij의 유·무효 선로조류량에 대한 민감도
 $d_{ij,k}^P, d_{ij,k}^Q$ 선로-k의 상정사고에 대한 선로-ij의 유·무효 선로조류에 대한 민감도

† 교신저자, 正會員 : 建國大學 電氣工學科 助教授 · 工博
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 工博

** 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正會員 : 弘益大學 電子電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2006年 2月 5日

最終完了 : 2006年 4月 18日

1. 서 론

전력산업에 경제적인 개념을 도입하고자 하는 전력산업 내부의 압력으로 인하여 전 세계의 전력산업은 지난 십여 년간 급진적인 구조개편을 진행하여 왔다. 이러한 구조개편

과정에 있어 가장 중요한 것은 전력시장을 어떻게 설계하는가이다[1]. 전력시장 설계의 범위는 매우 광범위하여 작게는 발전량과 소비량을 어떻게 측정하는가라는 문제에서부터 크게는 에너지시장, 보조서비스시장 및 용량시장의 거래와 가격구조를 어떻게 가져가는가 하는 문제까지 매우 복잡하고 다양한 문제를 다루고 있다. 전력시장 운영이 성공적으로 진행되기 위해서는 무엇보다도 상기 각 시장에 대한 시장가격이 얼마나 적정한가와 전력시장에서 전력계통의 신뢰도를 어떻게 확보할 수 있는가가 중요한 문제이다[2-5]. 특히, 경쟁적 전력시장을 설계할 때 전력계통의 안정화를 위하여 신뢰도를 확보할 수 있는 방법론이 필요하며 이를 위해서 현물에너지시장에 추가하여 계통보조서비스를 적절히 다룰 수 있는 방법이 구축되어야 한다.

에너지 시장과 계통보조서비스 시장 설계의 차이점은 에너지 상품과 계통보조서비스 상품의 특징을 명백하게 구분하는 것으로부터 출발한다[6]. 그러나 이러한 설계상의 차이점에도 불구하고 에너지 시장과 계통보조서비스 시장은 상호 밀접한 관계를 유지한다. 그 이유는 같은 자원과 같은 용량을 가진 동일한 자원을 이용하여 시장참여자의 경제적 판단에 따라 여러 제품을 생산해야 하기 때문이다. 에너지와 계통보조서비스를 제공하는데 있어 같은 설비를 이용한다는 점은 계통보조서비스 시장과 에너지 시장 사이의 상호결합최적화(Co-optimization 혹은 Joint Optimization)를 통하여 경제성을 확보하여야 하는데, 시장의 형태에 따라 구체적인 최적화 방법은 조금씩 차이가 발생하는 것이 필연적이다.

이러한 요구사항에 맞춰 경쟁적 전력시장에서 에너지와 예비력을 최적으로 공급할 수 있는 여러 방법론들이 개발되었다. Schweppe 등은 기존 에너지 시장에 대한 모션별 한계가격을 정의하고 이를 기반으로 하여 주파수 제어예비력 중에서 주파수제어증발(Frequency Regulation Up)예비력에 대한 한계가격을 도출하는 방법론을 제안하였다[7]. 또한 P. Varaiya 등은 전력계통의 신뢰도 혹은 안전도 확보를 위한 최적 사회적 효용을 도출할 수 있는 방법론을 제시하였다[8]. 하지만 위 두 방법론은 에너지 시장과 예비력 시장이 분리되었다고 전제하고 있으며 상정사고의 확률적 정보는 미리 사전에 확보되었다 가정하고 있다. 이에 반하여 Kumar 등은 에너지와 예비력 시장을 처음으로 결합하여 에너지와 예비력에 대한 결합 최적화 방법론을 처음으로 제안하였다[9]. 이 방법론에서는 모든 발전사업자와 수용가는 미리 정해진 비율만큼 예비력 시장에 참여하여야 하는 의무가 있다고 가정하여 최적화를 수행하였다. 그 외 [10-14] 등의 문헌에서 에너지와 예비력의 결합 최적화 방법론을 제시하고 있으나 상기 방법론들은 사전연구를 통해 순동예비력, 대기예비력, 대체예비력 등 요구량을 모션별 혹은 지역별로 정하여 최적화를 수행하고 있다. 하지만 상기 방법론과 같이 지역별 혹은 모션별로 예비력 요구량을 사전에 정한 후 최적화를 수행하여 도출한 해는 실제 사고에 대한 최적화 문제의 극부해 혹은 실현 불가능한 해(Infeasible Solution)가 될 수 있다. 따라서 상기 언급된 상정사고별로 요구되는 지역별 혹은 모션별 예비력 요구량은 에너지와 예비력의 결합 최적화 문제에서 결정되어야 할 변수가 되어야 한다.

대부분의 에너지와 예비력의 최적배분 방법론은 실시간 급전 혹은 계산 속도를 향상시키기 위해 A. J. Wood 등에 의해 제안된 DC 조류계산 기반의 발전기 혹은 선로의 사고에 대한 민감도를 이용하여 최적해를 도출하고 있다[15,16]. 그러나 DC 조류계산 기반의 상정사고 해석은 전력계통의 모션별 전압을 일정하게 유지하여 해석되기 때문에 실제 사고 발생시 모션 전압이 변하는 것을 반영할 수가 없다. 따라서 상정사고에 대한 물리적인 특성을 보다 정확하게 반영하기 위해서는 AC 조류계산을 기반으로 하는 방법론이 적용되어야 한다. 하지만 AC 조류계산 기반으로 적용된 방법론들은 상정사고에 대하여 민감도를 적용함이 없이 각 상정사고에 대하여 사전에 계통데이터를 변경하여 최적화를 수행하기 때문에 익일의 전력공급 계획시 n-1 상정사고를 고려하여 계획을 수행하게 되는 경우 연산에 대한 부담이 매우 크게 된다[12].

따라서 본 논문에서는 AC 조류계산 기반의 제약조건과 민감도를 이용하여 n-1 발전기 및 송전선로의 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력을 확보할 수 있는 최적화 방법론을 제시하였다. 상기에서 언급한 바와 같이, 기존 연구의 한계점들을 보완하기 위하여 본 논문은 우선 AC 조류계산 기반의 제약조건을 고려한 상정사고에 대한 최적화 방법론을 DC 조류계산 기반의 방법론을 제안한 F. D. Galiana[17]의 방법론을 토대로 하여 구성하였다. 이때 발전기 및 송전선로의 상정사고에 대비할 수 있는 에너지와 주파수 제어예비력을 확보할 수 있는 최적화 문제는 계통데이터의 변경없이 적용 가능하도록 AC 조류계산 기반의 민감도를 도출하여 발전기 및 송전선로의 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력을 확보할 수 있는 최적화 문제에 포함할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한, 본 논문에서 제안하는 방법론의 효율성을 입증하기 위하여, 5모션 표본계통과 수정된 IEEE 14모션 표본계통에 적용하여 사례연구를 수행하였다.

2. 기존 최적배분 방법론

본 논문에서는 기존의 에너지와 예비력의 최적배분 방법론에 대해 간단히 언급한 후, 본 논문에서 적용한 AC 조류계산 기반의 n-1 발전기 및 송전선로의 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력을 확보할 수 있는 최적화 문제에 대해 기술하고자 한다. F. D. Galiana 등이 제안하고 있는 에너지와 예비력의 결합최적화 방법론은 부하측 입찰을 고려한 사회적 효용 극대화를 위한 목적함수와 제약조건으로 구성되어 있다. 목적함수는 아래의 식과 같으며, 여기에서는 부하측 입찰을 제외하고 기술하였다.

$$Min \left\{ \sum_k C_k(P_{g,k}) + \sum_k q_{g,k}^{UP} P_{g,k}^{UP} + \sum_k q_{g,k}^{DOWN} P_{g,k}^{DOWN} \right\} \quad (1)$$

여기서 k 는 발전기 인덱스이다.

또한 에너지와 예비력의 최적배분 문제를 위한 등식 및 부등식 제약조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_g - P_L - B\delta &= 0 \\ P_g^C - P_L - B^C\delta^C &= 0 \end{aligned} \quad (2.a)$$

$$P_f = H\delta \tag{2.b}$$

$$P_f^C = H^C \delta^C$$

$$-\bar{P}_f \leq P_f \leq \bar{P}_f \tag{2.c}$$

$$-\bar{P}_f^C \leq P_f^C \leq \bar{P}_f^C$$

$$\underline{P}_{g,k} \leq P_{g,k} \leq \bar{P}_{g,k} \tag{2.d}$$

$$\underline{P}_{g,k}^C \leq P_{g,k}^C \leq \bar{P}_{g,k}^C$$

$$P_{g,k} - P_{g,k}^{DOWN} \leq P_{g,k}^C \leq P_{g,k} + P_{g,k}^{UP} \tag{2.e}$$

상기 방법론은 DC 조류계산을 기반으로 하여 에너지와 주파수 제어예비력의 결합최적화를 수행하고 있다. 이때 상기 방법론은 상정사고-C의 유무에 따라 제약조건을 달리 두고 상정사고 유무에 대한 발전량(P_g, P_g^C)을 도출하고 있다. 이때 식 (2.e)로부터 상정사고-C에 대한 발전량 P_g^C 는 상정사고-C가 고려되지 않은 발전량 P_g , 즉 기준계통에서의 최적 발전량과 주파수 제어예비력의 합 혹은 차가 된다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력의 결합최적화에서 DC 조류계산을 기반으로 하게 되는 경우 모션별 전압의 영향을 고려할 수 없게 된다.

3. 에너지와 주파수 제어예비력의 최적배분 제안 방법론

3.1 에너지와 주파수 제어예비력의 최적화 방법론

본 논문에서는 실제 전력계통의 물리적인 특성을 보다 정확하게 고려하기 위하여 AC 조류계산 기반의 민감도를 도출하고 AC 기반 민감도에 기반한 에너지와 주파수 제어예비력을 최적으로 도출할 수 있는 방법을 제안한다. 위와 같이 에너지와 주파수 제어예비력의 최적화를 수행하기 위하여 우선 기준계통(Base Case)에 대한 AC 기반의 최적조류계산을 수행하고, 기준계통의 최적조류계산 결과를 이용하여 발전기나 송전선로의 사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력의 최적화를 수행하게 된다.

3.1.1 기준계통의 에너지 최적배분 방법론

우선 본 논문에서 에너지와 주파수 제어예비력의 최적화를 수행하기 위해 요구되는 기준 계통의 AC 최적조류계산, 즉 에너지 시장의 급전 최적화 문제를 수행하기 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$\min \sum_{k=1}^{n_g} C_k(P_{g,k}) \tag{3}$$

또한 기준계통에 대한 에너지 최적배분을 위해 적용된 등식 제약조건들은 다음과 같다.

$$P_{L,i} - P_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^C} P_{g,k} = 0 \tag{4}$$

$$Q_{L,i} - Q_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^C} Q_{g,k} = 0$$

다음은 본 논문에서 고려한 최적조류계산을 수행하기 위해 고려한 부등식 제약조건들이다.

$$\underline{P}_{g,k} \leq P_{g,k} \leq \bar{P}_{g,k}$$

$$\underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \tag{5}$$

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i$$

3.1.2 에너지와 주파수 제어예비력의 최적화 방법론

본 논문에서 상기 언급한 기준계통의 최적화 방법론의 결과를 초기값으로 설정한 후, 다음과 같이 주어진 목적함수와 제약조건에 따라 n-1 발전기 및 송전선로의 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력을 확보할 수 있는 최적화를 수행하게 된다. 이때 본 논문에서 제시한 방법론은 상정사고에 따라 기준계통의 데이터를 변경하거나 DC 기반의 민감도를 이용하는 기존에 제시된 방법론과 달리, 각 상정사고에 대하여 본 논문에서 제안한 AC 조류계산 기반의 민감도를 이용하여 기준계통의 데이터를 변경하지 않고 수행하게 된다.

$$\min \sum_{k=1}^{n_g} C_k(P_{g_k}) + \sum_{k=1}^{n_g} C_k^{UP}(P_{g_k}^{UP}) \tag{6}$$

$$+ \sum_{i=1}^{n_g} C_k^{DOWN}(P_{g_k}^{DOWN}) + \xi\phi$$

여기에서 ϕ 는 n-1 상정사고와 관련된 변수이고, ξ 는 상정사고가 발생한 변수의 값을 영(0)으로 만들 수 있도록 주어지는 충분히 큰 값이다. 위 식에서 ϕ 의 값은 발전기 상정사고의 경우 발전기의 유·무효 발전량 변수의 값이고, 송전선로 상정사고의 경우 송전선로의 유·무효 선로조류량 변수의 값이다. 특히, 발전기의 상정사고의 경우에는 발전기의 최소발전량의 값을 영(0)으로 설정하여 최적화를 수행한다.

또한 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력을 공급하기 위한 등식 제약조건은 다음과 같다. 이때 각 모션별 유·무효 부하량은 상정사고가 발생하기 전과 동일하다.

$$P_{L,i} - P_{ij}^C(X) - \sum_{k \in \Omega_i^C} P_{g,k}^C = 0$$

$$Q_{L,i} - Q_{ij}^C(X) - \sum_{k \in \Omega_i^C} Q_{g,k}^C = 0 \tag{7}$$

상기 등식 제약조건에서 상정사고에 대한 선로조류 함수는 다음과 같이 상정사고에 대한 AC 기반의 민감도 함수가 고려된 함수로 구성된다. 본 논문에서 제안한 상정사고에 대한 AC 기반의 선로조류 민감도 함수는 다음의 3.3절에서 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{ij}^C(X) &= g_{ij}(V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)) \\
 &\quad - b_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) + \theta_{P_{ij}}^C \\
 Q_{ij}^C(X) &= b_{ij}(-V_i^2 + V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)) \\
 &\quad - g_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) - V_i^2 y_c + \theta_{Q_{ij}}^C
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력의 최적화를 수행할 때 요구되는 주파수 제어증발과 주파수 제어감발예비력 공급량은 다음과 같이 상정사고가 고려되지 않을 때의 발전량과 상정사고가 발생한 경우의 발전량의 차이로 주어진다. 즉, 상정사고가 고려된 경우의 발전량과 상정사고가 고려되지 않을 경우의 발전량의 차이가 양이면 주파수 제어증발예비력이 필요하며, 그 반대의 경우에는 주파수 제어감발예비력이 필요함을 나타내는 제약조건이다.

$$\begin{aligned}
 P_{g,k}^{UP} &\geq P_{g,k}^C - P_{g,k} \\
 P_{g,k}^{DOWN} &\geq P_{g,k} - P_{g,k}^C
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

다음은 최적화를 수행할 때 요구되는 발전제약, 선로제약, 모선별 전압제약들이다. 이때 실제로 선로의 제약용량은 전압안정도, 과도안정도 등을 고려하여 적용하여야 하나, 본 논문에서는 상정사고 발생시 선로제약용량은 이미 정해져 있는 것으로 고려하였다.

$$\begin{aligned}
 \underline{P}_{g,k} &\leq P_{g,k}^C \leq \bar{P}_{g,k} \\
 \underline{P}_{ij}^C &\leq P_{ij}^C \leq \bar{P}_{ij}^C \\
 \underline{V}_i &\leq V_i \leq \bar{V}_i
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

3.2 사전 주파수 제어예비력 요구량 산정과 실시간 적용 방법론

본 논문의 상정사고에 대한 에너지와 주파수 제어예비력을 확보할 수 있는 최적화 방법론은 AC 조류계산 기반의 제약조건과 n-1 상정사고에 대한 민감도를 이용하여 최적해를 도출하게 된다. 하지만 실시간 급전시 발생할 수 있는 사고에 대비하기 위해서는 사전에 상정사고 해석 결과를 이용하여 적용할 필요가 있다. 하지만 기존의 방법론은 DC 조류계산 기반의 제약조건과 민감도를 이용하거나 사전에 필요한 예비력을 미리 산정해 놓고 실시간 급전에 적용하기 때문에 전력계통의 실제 물리적인 특성을 반영하기에는 한계가 있다. 따라서 익일의 사고에 대비하기 위해서 상기 논문에서 제안한 최적화 방법론을 이용하여 다음과 같은 방법으로 각 시간대별로 적용할 필요가 있다.

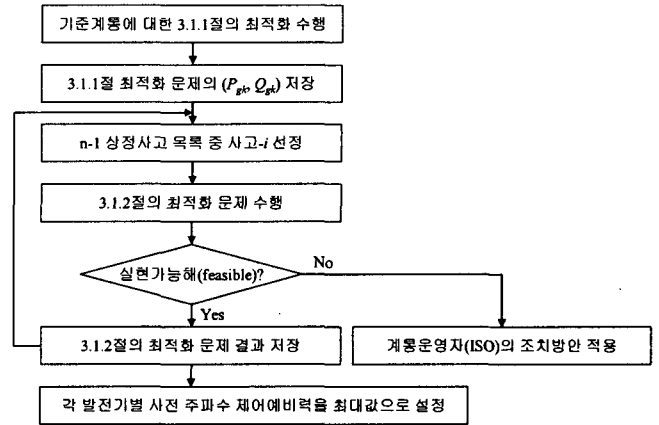


그림 1 사전 주파수 제어예비력 요구량 산정
Fig. 1 Evaluation of requirement of frequency control reserve

그림 1에서 보여지는 것처럼 실시간 급전시 발생할 수 있는 사고에 대한 주파수 제어예비력의 요구량은 모든 가능한 n-1 상정사고에 대해서 본 논문에서 제안한 최적화 방법론을 수행하고 수행한 결과를 저장한 후 모든 상정사고 중에서 주파수 제어예비력이 가장 큰 값을 각 발전기별로 할당하면 된다. 만약 실현불가능한 해가 도출된 경우 계통운영자는 부하차단 등의 조치방안을 강구해야 한다. 이때 본 논문에서 제안한 방법론은 AC 조류계산 기반의 민감도를 이용하여 계통데이터의 변경 없이 수행할 수 있기 때문에 계통데이터를 변경하여 적용하는 DC 민감도 기반의 방법론에 비해 계산에 대한 부담이 줄어들면서 실제 전력계통의 물리적인 특성을 반영할 수 있다. 또한 실시간 급전을 하는 동안 사고가 발생한 경우에는 상기 그림에서 저장된 결과를 이용하여 급전이 가능하게 된다. 이는 본 논문에서 제안한 방법론이 전력계통의 물리적 특성을 반영하여 AC 조류계산 기반에 의해 도출된 민감도를 이용하기 때문에 DC 민감도를 이용하는 경우에 비해 보다 정확한 해를 도출하기 때문이다.

3.3 상정사고에 대한 선로조류 민감도 함수

본 절에서는 본 논문에서 제안한 상정사고에 대한 AC 조류계산 기반의 선로조류 민감도에 대해 언급하고자 한다. 본 논문에서 고려한 상정사고는 발전기가 고장이 난 경우와 선로에 고장이 발생한 경우 2가지로 볼 수 있다.

3.3.1 발전기 상정사고에 대한 선로조류 민감도 함수

본 논문에서 발전기 상정사고에 대한 유·무효 선로조류량에 대한 민감도를 도출하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 가정 1 : 송전선로의 유효 선로조류량의 변화는 특정 모선의 유효 유입전력의 변화에 의해서만 나타나고, 무효 선로조류량의 변화는 특정 모선의 무효 유입전력의 변화에 의해서만 나타난다. 즉, 유효전력의 변화량과 무효전력의 변화량은 서로 독립적이다.

다음과 같이 모선- k 의 유·무효 유입전력 변화량에 대한 선로- ij 의 유·무효 선로조류 변화량은 가정 1에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$a_{ij,k}^P \equiv \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_k}, \quad a_{ij,k}^Q \equiv \frac{\Delta Q_{ij}}{\Delta Q_k} \quad (11)$$

여기에서 ΔP_k 와 ΔQ_k 는 모선- k 에 연결된 발전기의 상정 사고에 대한 모선- k 의 유·무효 발전변화량이다. 따라서 ΔP_k 와 ΔQ_k 는 상정사고 이전의 유·무효 발전량이 된다. 또한 ΔP_{ij} 와 ΔQ_{ij} 는 모선- k 에 연결된 발전기의 상정 사고에 대한 선로- ij 의 유·무효 선로조류 변화량을 나타낸다.

모선- k 에 연결된 발전기의 상정 사고에 대한 선로- ij 의 유·무효 선로조류량에 대한 민감도는 다음과 같이 모선별 전압과 위상각에 대한 편미분 함수로 주어진다. 이때 선로- ij 의 유·무효 선로조류 함수는 모선- i 와 모선- j 의 전압과 위상각만의 함수로 주어지기 때문에 모선- k 에 연결된 발전기의 상정 사고에 대한 선로- ij 의 유·무효 선로조류 민감도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{ij,k}^P &= \sum_{h=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_h} \frac{\partial \theta_h}{\partial P_k} + \sum_{h=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_h} \frac{\partial V_h}{\partial P_k} \\ &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_k} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_k} \\ a_{ij,k}^Q &= \sum_{h=1}^n \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_h} \frac{\partial \theta_h}{\partial Q_k} + \sum_{h=1}^n \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_h} \frac{\partial V_h}{\partial Q_k} \\ &= \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_k} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_k} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_k} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_k} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_h}, \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_h} \quad \text{모선-}h\text{의 전압과 위상각 변화에 대한 선로-}ij \text{의 유효조류 변화량,}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_h}, \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_h} \quad \text{모선-}h\text{의 전압과 위상각 변화에 대한 선로-}ij \text{의 무효조류 변화량,}$$

$$\frac{\partial V_h}{\partial P_k}, \frac{\partial \theta_h}{\partial P_k} \quad \text{모선-}k\text{의 유효 유입전력 변화에 대한 모선-}h \text{의 전압, 위상각 변화량,}$$

$$\frac{\partial V_h}{\partial Q_k}, \frac{\partial \theta_h}{\partial Q_k} \quad \text{모선-}k\text{의 무효 유입전력 변화에 대한 모선-}h \text{의 전압, 위상각 변화량.}$$

상기 식에서 모선- k 의 유·무효 유입전력 변화에 대한 전압과 위상각 변화량은 AC 조류계산에서 자코비안 행렬의 역행렬의 정보를 통해 도출되며, 각 모선별 전압과 위상각 변화에 대한 선로조류 변화량은 상기에서 언급한 유·무효 선로조류 함수를 모선별 전압과 위상각으로 미분하여 도출된다.

본 연구에서 제안한 최적배분 방법론의 정식화에서 발전기 상정 사고에 대한 선로조류량에 대한 민감도 함수 $\theta_{P_k}^C$, $\theta_{Q_k}^C$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{P_k}^C &= \alpha_{ij,k}^P \Delta P_k \\ \theta_{Q_k}^C &= \alpha_{ij,k}^Q \Delta Q_k \end{aligned} \quad (13)$$

본 논문에서 제안한 AC 조류계산 기반의 상정 사고에 대한 민감도는 최적화 반복과정에서 모선의 전압과 위상각이 계속 변하기 때문에 최적화 반복과정마다 상기 민감도를 도출하여 적용하였다.

3.3.2 선로 상정 사고에 대한 선로조류 민감도

본 논문에서 제안한 선로의 상정 사고에 대한 유·무효 선로조류의 민감도를 발전기 상정 사고에 대한 선로조류 민감도 도출 방법론과 마찬가지로 다음과 같은 가정이 필요하다.

■ 가정 2 : 가정 1과 마찬가지로 송전선로의 유효 선로조류량의 변화는 특정 선로의 유효전력의 변화에 의해서만 나타나고, 무효 선로조류량의 변화는 특정 선로의 무효전력의 변화에 의해서만 나타난다.

■ 가정 3 : 기존 문헌에 따르면 사고가 발생한 선로의 선로조류는 다음 그림과 같이 다른 모선을 고려하지 않고 사고 발생 선로의 양단만의 유입전력량으로만 모델링을 하고 있다. 즉, 사고가 발생한 선로조류량은 다른 모선에 영향을 주지 않고 사고 발생한 양단의 유입전력에만 영향을 준다고 가정하고 있다.

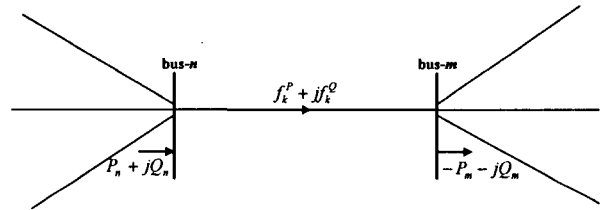


그림 2 상정 사고를 고려하기 이전 선로 조류량
Fig. 2 Line flow without considering contingency

따라서 본 논문에서는 특정 선로에 사고가 발생하였을 때 그 선로의 선로조류 변화량은 다음 그림과 같이 전력계통 내의 다른 모선의 유입전력 변화에는 영향을 주지 않고 사고가 발생한 선로의 양단 유입전력에만 영향을 준다고 가정하였다.

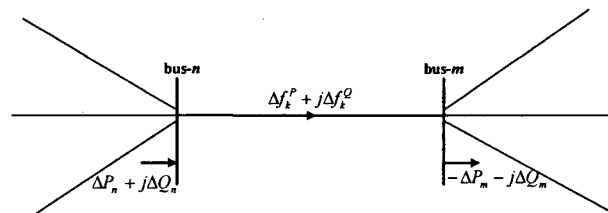


그림 3 상정 사고를 고려한 이후 선로조류 변화량
Fig. 3 Change of line flow under contingency

따라서 사고가 발생한 선로의 선로조류의 변화량은 상기

에서 언급한 발전기 상정사고에 대한 선로조류 민감도 함수를 도출할 때 도입한 가정 1과 가정 3을 도입하면 다음과 같이 양단 선로의 유입전력의 변화량과 동일하다.

$$\begin{aligned}\Delta P_n &= -\Delta P_m = \Delta f_k^P \\ \Delta Q_n &= -\Delta Q_m = \Delta f_k^Q\end{aligned}\quad (14)$$

여기서 ΔP_n 과 ΔP_m 은 사고가 발생한 선로- k 의 양단 모선- n 과 모선- m 의 유효 유입전력 변화량이며, ΔQ_n 과 ΔQ_m 은 사고가 발생한 선로- k 의 양단 모선- n 과 모선- m 의 무효 유입전력 변화량이다. 또한 Δf_k^P 와 Δf_k^Q 는 선로- k 의 유·무효 선로조류 변화량을 나타낸다.

발전기 상정사고에 대한 민감도와 마찬가지로 선로- k 의 상정사고에 대한 민감도 함수는 가정 2에 의해 유·무효 선로조류 변화량에 대한 선로- ij 의 유·무효 선로조류의 변화량으로 정의된다.

$$d_{ij,k}^P \equiv \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta f_k^P}, \quad d_{ij,k}^Q \equiv \frac{\Delta Q_{ij}}{\Delta f_k^Q}\quad (15)$$

이때 선로- ij 의 유·무효 선로조류 함수에 대한 테일러급수의 1차항까지만 고려하였을 때 유·무효 선로조류 변화량은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}\Delta P_{ij} &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \Delta V_j \\ \Delta Q_{ij} &= \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \Delta V_j\end{aligned}\quad (16)$$

이때 자코비안 역행렬에서 각 모선의 위상각과 전압의 변화량은 상기 언급한 가정 3에 의해 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned}\Delta \theta_i &= \frac{\partial \theta_i}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial \theta_i}{\partial P_m} \Delta P_m + \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_m} \Delta Q_m \\ \Delta \theta_j &= \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial \theta_j}{\partial P_m} \Delta P_m + \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_m} \Delta Q_m \\ \Delta V_i &= \frac{\partial V_i}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial V_i}{\partial P_m} \Delta P_m + \frac{\partial V_i}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial V_i}{\partial Q_m} \Delta Q_m \\ \Delta V_j &= \frac{\partial V_j}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial V_j}{\partial P_m} \Delta P_m + \frac{\partial V_j}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \Delta Q_m\end{aligned}\quad (17)$$

상기 선로- ij 의 유입전력에 대한 테일러급수 전개식의 각 원소들은 다음과 같이 가정 1과 자코비안의 행렬의 역행렬로부터 도출되는 각 모선의 위상각과 전압 변화량의 함수를 도입하면 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_m} \Delta P_m \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_m} \Delta P_m\end{aligned}\quad (18.a)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \Delta V_i &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_m} \Delta P_m \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \Delta V_j &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_n} \Delta P_n + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_m} \Delta P_m\end{aligned}\quad (18.b)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_m} \Delta Q_m\quad (18.c)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j &= \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_m} \Delta Q_m \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \Delta V_i &= \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_m} \Delta Q_m \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \Delta V_j &= \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_n} \Delta Q_n + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \Delta Q_m\end{aligned}\quad (18.d)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{ij} &= \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_n} \right] \Delta P_n \\ &+ \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_m} \right] \Delta P_m \\ &= \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_n} \right] \Delta f_k^P \\ &- \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_m} \right] \Delta f_k^Q\end{aligned}\quad (19.a)$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_{ij} &= \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_n} \right] \Delta Q_n \\ &+ \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \right] \Delta Q_m \\ &= \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_n} \right] \Delta f_k^Q \\ &- \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \right] \Delta f_k^P\end{aligned}\quad (19.b)$$

$$\begin{aligned}d_{ij,k}^P &= \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_n} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_n} \right] \\ &- \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_m} \right]\end{aligned}\quad (20.a)$$

$$\begin{aligned}d_{ij,k}^Q &= \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_n} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_n} \right] \\ &- \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_m} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_m} \right]\end{aligned}\quad (20.b)$$

선로- ij 의 유·무효 선로조류량의 테일러 급수를 전개한 후, 가정 3을 적용하면 선로- ij 의 선로조류 변화량은 식 (19)와 같이 전개된다. 따라서 선로- k 의 상정사고에 대한 각 선로의 선로조류량에 대한 민감도는 식 (20)과 같이 도출된다.

따라서 본 연구에서 제안한 최적배분 방법론의 정식화에서 언급한 선로- k 의 상정사고에 대한 선로조류량 P_{ij}^C 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{P_k}^C = d_{ij,k}^P \Delta f_k^P\quad (21)$$

$$\theta_{Q_k}^C = d_{ij,k}^Q \Delta f_k^Q$$

이때 본 논문에서는 발전기 상정사고에 대한 최적화 방법론과 마찬가지로 선로- k 의 상정사고에 대한 최적화 수행시 상기 민감도를 최적화 반복과정마다 도출하여 적용하였다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법론들의 효용성을 입증하기 위해서 5모선 표본계통과 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 대해 다음과 같이 사례연구를 수행하였다. 상기 표본계통에 대한 사례연구는 GAMS의 모듈 중 CONOPT를 이용하여 수행하였다.

4.1 5모선 표본계통 사례

4.1.1 5모선 표본계통의 입력데이터

다음은 5모선 표본계통이다.

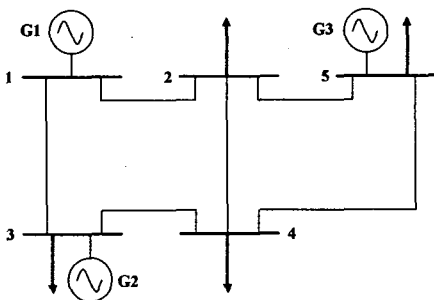


그림 4 5모선 표본계통도
Fig. 4 5-bus sample system

다음의 표 1-3은 상기 5모선 표본계통에 대한 모선, 송전선로, 발전기 데이터 및 전압, 송전용량, 발전 제약을 나타낸다.

표 1 5모선 표본계통의 모선 데이터

Table 1 Bus data of 5-bus sample system

모선	초기전압	초기 위상각	전압제약		부하량	
			최대	최소	MW	MVar
1	1.04	0	1.05	0.9	0	0
2	1	0	1.05	0.9	70	70
3	1.03	0	1.05	0.9	25	25
4	1	0	1.05	0.9	25	25
5	1	0	1.05	0.9	30	30

표 2 5모선 표본계통의 선로 데이터

Table 2 Line data of 5-bus sample system

선로 번호	From	To	저항	선로리액턴스	Normal		Emergency	
					MAX	MIN	MAX	MIN
					1	1	2	0.012
2	1	3	0.013	0.25	55	-55	60	-60
3	3	4	0.01	0.25	55	-55	60	-60
4	2	5	0.02	0.2	55	-55	60	-60
5	2	4	0.025	0.15	55	-55	60	-60
6	4	5	0.012	0.15	55	-55	60	-60

상기 5모선 표본계통의 선로 데이터에서 "Normal"은 상정사고를 고려하지 않을 경우, 즉 기준계통의 에너지 최적배분 문제의 선로의 최대와 최소용량을 의미하고 "Emergency"

는 상정사고를 고려할 경우의 선로의 최대와 최소용량을 의미한다.

표 3 5모선 표본계통의 발전기 데이터

Table 3 Generator data in 5-bus sample system

발전기명	모선	에너지 입찰가격데이터		예비력 입찰가격	발전제약	
		a_i	b_i		최소	최대
G1	1	7.92	0.001562	8.24802	30	150
G2	3	7.85	0.00194	8.1216	20	100
G3	5	7.97	0.00482	8.50984	5	80

상기 데이터에서 에너지 시장에 다음과 같이 입찰가격을 제시한다고 가정하고 예비력 시장에서는 상기 데이터와 같이 상수로 입찰가격을 제시한다고 가정하였으며 각 발전기의 증감발출(Ramp Rate)은 동일하다고 가정하였다.

$$C_i = a_i + 2 \times b_i \times P_{G_i} \quad (22)$$

또한 상기 계통의 기준모선은 모선-1에 위치해 있으며 100MW를 기준값(Base)으로 설정하여 사례연구를 수행하였다.

4.1.2 5모선 표본계통 최적화 결과

본 절에서는 상기 단순 5모선 계통에 대하여 발전기와 선로에 대한 n-1 상정사고를 본 논문에서 제안한 방법론의 결과와 5모선 표본계통에서 발전기와 선로를 하나씩 제거하여 최적조류계산을 실행한 결과와 비교하고자 한다. 먼저 상기 데이터를 이용하여 상정사고를 고려하지 않은 기준계통의 에너지 최적분배 문제의 발전기별 발전량은 다음과 같다.

표 4 상정사고를 고려하지 않은 경우 발전량

Table 4 Generation without contingency analysis

발전기명	모선	발전량		비용
		MW	Mvar	
1	1	57.338	36.811	8.099
2	3	67.703	51.722	8.113
3	5	25.977	76.691	8.220

상기 5모선 표본계통에서 상정사고 해석 수행시 모선-5에 연결된 발전기-3의 상정사고 발생시 실현 불가능 해가 도출된다. 이는 발전기-3이 부하중심지역에 연결되어 있어서 사고가 발생한 경우 모선-1과 모선-2에 연결된 발전기-1과 발전기-2가 전체 수요만큼 발전을 하여야 하나 송전제약에 의해 수급조건을 만족시키지 못하기 때문이다. 따라서 우선 발전기-1과 발전기-2에 대한 상정사고에 대한 본 논문에서 제안한 방법론의 결과와 실제 사고를 가정한 결과를 비교하였다.

표 5 G1 상정사고에 대한 각 발전기의 발전량 결과
Table 5 Generation results for the contingency of G1

발전기 명	민감도 기반 제안방법(MW)			실제 최적조류계산 결과(MW)			오차 (%)
	P_g^C	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}	P_g^C	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}	
	G1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
G2	100.00	32.96	0.00	100.00	32.96	0.00	0.00
G3	51.20	26.50	0.00	51.20	26.50	0.00	0.00

표 6 G2 상정사고에 대한 각 발전기의 발전량 결과
Table 6 Generation results for the contingency of G2

발전기 명	제안방법(MW)			실제 최적조류계산 결과(MW)			오차 (%)
	P_g^C	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}	P_g^C	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}	
	G1	98.16	38.86	0.00	98.16	38.86	
G2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G3	53.12	28.43	0.00	53.12	28.43	0.00	0.00

위 결과에서 " P_g^C "는 상정사고에 대한 발전기별 에너지와 주파수 제어예비력의 합 혹은 차를 나타내며, " P_g^{UP} "은 발전기별 주파수 제어증발예비력, " P_g^{DOWN} "은 주파수 제어감발예비력을 나타낸다. 마지막으로 "오차"는 제안방법론의 " P_g^C "의 결과와 실제 사고를 전제하였을 때의 " P_g^C "의 결과의 차이를 나타낸다. 위 결과로부터 발전기의 상정사고의 경우 본 논문에서 제안한 최적화 방법론의 결과와 실제 결과는 오차가 0.0%로 동일함을 알 수 있다.

다음은 발전기의 상정사고와 마찬가지로 송전선로 각각의 상정사고에 대한 본 논문에서 제안한 방법론과 실제 사고를 가정하여 최적조류계산을 수행한 결과와의 차이를 비교하였다. 이때 결과 비교는 다음과 같이 송전선로의 상정사고에 대한 발전기별 에너지와 주파수 제어예비력의 합 혹은 차를 나타내는 " P_g^C "의 오차만 비교하였다.

표 7 송전선로 상정사고별 각 발전기의 발전량 비교
Table 7 Comparison of generation for each generator by line contingency

발전기명	선로 상정사고별 오차(%)					
	선로-12	선로-13	선로-34	선로-25	선로-24	선로-45
G1	29.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
G2	16.2	0.0	18.6	13.4	12.2	0.1
G3	37.0	0.0	41.4	0.0	0.0	0.0
평균	27.5	0.0	20.0	4.5	4.1	0.0

위 결과로부터 발전기의 상정사고와 달리 송전선로의 상정사고의 경우 평균오차가 최대 27.5%에서 최소 0.0%까지 큰 오차가 발생한다. 이는 계통데이터의 변경 없이 민감도만을 이용하여 최적화 문제를 수행하기 때문이며, 이때 각 결과의 오차는 상정사고를 고려하기 전 송전선로의 조류량이 크면 클수록 각 선로의 상정사고에 대한 오차도 커진다.

또한 각 상정사고에 대하여 본 논문에서 제안한 방법론과 실제 사고를 전제한 경우의 유효 선로조류량의 결과를 다음과 같이 비교하였다.

표 8 선로 상정사고별 유효전력 선로조류량의 오차
Table 8 Line flow error by each contingency of transmission line

From	To	선로 상정사고별 오차(%)					
		선로-12	선로-13	선로-34	선로-25	선로-24	선로-45
2	4	27.5	1.76	0.91	3.02	14.39	8.09
2	5	32.5	1.55	13.72	8.67	6.00	2.02
2	1	60.0	3.30	0.41	5.65	8.39	0.87
3	4	29.0	3.87	31.53	7.45	3.51	1.32
3	1	45.1	3.88	11.37	5.98	7.66	1.46
4	2	20.3	1.89	1.89	6.21	3.38	7.90
4	3	17.4	4.22	39.55	6.56	1.19	1.74
4	5	2.1	2.33	12.35	0.35	4.57	9.64
5	2	31.7	2.19	14.37	3.22	10.40	1.13
5	4	4.3	2.19	10.94	3.22	10.40	9.48
1	2	27.9	3.87	11.46	5.26	6.39	1.47
1	3	57.2	3.87	10.07	5.26	5.36	1.47
평균오차		29.6	2.9	13.2	5.1	6.8	3.9

위 결과로부터 선로 상정사고별 발전량 결과와 마찬가지로 본 논문에서 제안한 방법론과 실제 사고를 고려한 경우에 대한 선로조류의 결과에 차이가 남을 알 수 있다. 이는 언급한 바와 같이 실제 계통 데이터의 변경이 없이 민감도만을 이용하여 최적화 문제의 해를 도출하기 때문에 오차가 발생하고, 적용된 표본계통의 규모가 작기 때문에 실제로 계통의 변화가 약간 발생한 경우의 결과가 변화가 일어나지 않을 때의 결과와 비교하였을 때 매우 크기 때문에 상기 오차가 발생한다고 판단된다.

상기 5모선 표본계통에 대하여 실시간 급전시의 n-1 사고에 대비하기 위하여 요구되는 주파수 제어예비력을 본 논문에서 제안한 결과와 실제 n-1 사고를 전제하여 GAMS를 이용하여 도출한 결과를 비교하고자 한다. 다음은 발전기-3의 상정사고를 제외한 나머지 발전기와 선로의 n-1 상정사고에 대한 주파수 제어예비력의 사전 요구량 결과이다.

표 9 주파수 제어예비력 요구량 결과
Table 9 Results of requirement for frequency control reserve

발전기명	제안방법(MW)		사고를 전제한 결과(MW)	
	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}
G1	38.858	29.304	38.858	0.000
G2	32.964	24.759	32.964	41.256
G3	28.431	0.000	42.038	0.000

위 결과에서 주파수 제어예비력의 요구량은 앞에서 언급한 바와 같이 발전기와 선로의 n-1 상정사고 목록을 모두 수행하여 각 발전기별로 주파수 제어증발과 주파수 제어감발예비력의 가장 큰 값으로 설정하였다. 따라서 특정 발전기는 주파수 제어증발과 주파수 제어감발예비력이 동시에 요구될 수도 있다. 위의 결과는 본 논문에서 제안한 방법론이 선로의 상정사고의 경우 오차가 발생함으로 인하여 실제 사고를 전제하였을 경우의 결과와 차이가 발생한다. 하지만 위의 결과는 기존의 DC 조류계산의 결과에 비해 보다 나은 해를 제공할 수 있을 것이며 실제 사고를 고려하는 경우보다 연산에 대한 부담을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 수정된 IEEE 14모선 표본계통 사례

4.2.1 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 입력데이터

다음은 수정된 IEEE 14모선 표본계통이다.

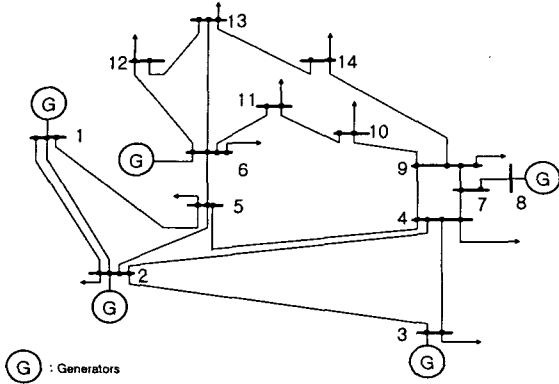


그림 5 수정된 IEEE 14모선 표본계통
Fig. 5 Modified IEEE 14-bus sample system

다음의 표 10-12는 상기 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 대한 모선, 송전선로, 발전기 데이터 및 전압, 송전용량, 발전 제약은 나타낸다.

표 10 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 모선 데이터

Table 10 Bus data of modified IEEE 14-bus sample system

모선	초기전압	초기 위상각	전압제약		부하량	
			최대	최소	MW	MVar
1	1.06	0	1.05	0.9	0	0
2	1.045	0	1.05	0.9	21.7	12.7
3	1.01	0	1.05	0.9	94.2	19
4	1	0	1.05	0.9	47.8	-3.9
5	1	0	1.05	0.9	7.6	1.6
6	1.07	0	1.05	0.9	11.2	7.5
7	1	0	1.05	0.9	0	0
8	1.09	0	1.05	0.9	0	0
9	1	0	1.05	0.9	29.5	16.6
10	1	0	1.05	0.9	9	5.8
11	1	0	1.05	0.9	3.5	1.8
12	1	0	1.05	0.9	6.1	1.6
13	1	0	1.05	0.9	13.5	5.8
14	1	0	1.05	0.9	14.9	5

표 11 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 선로 데이터

Table 11 Line data of modified IEEE 14-bus sample system

선로 번호	From	To	저항	선로 리액턴스	대지 커패시턴스	Normal		Emergency	
						MAX	MIN	MAX	MIN
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0628	45	-45	50	-50
2	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	45	-45	50	-50
3	2	4	0.05811	0.17632	0.0374	45	-45	50	-50
4	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	45	-45	50	-50
5	2	5	0.05695	0.17388	0.034	45	-45	50	-50
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0346	45	-45	50	-50
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0128	45	-45	50	-50
8	5	6	0	0.25202	0	45	-45	50	-50
9	4	7	0	0.20912	0	45	-45	50	-50
10	7	8	0	0.17615	0	45	-45	50	-50
11	4	9	0	0.55618	0	45	-45	50	-50
12	7	9	0	0.11001	0	45	-45	50	-50
13	9	10	0.03181	0.0845	0	45	-45	50	-50

14	6	11	0.09498	0.1989	0	45	-45	50	-50
15	6	12	0.12291	0.25581	0	45	-45	50	-50
16	6	13	0.06615	0.13027	0	45	-45	50	-50
17	9	14	0.12711	0.27038	0	45	-45	50	-50
18	10	11	0.08205	0.19207	0	45	-45	50	-50
19	12	13	0.22092	0.19988	0	45	-45	50	-50
20	13	14	0.17093	0.34802	0	45	-45	50	-50

표 12 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 발전기 데이터

Table 12 Generator data in modified IEEE 14-bus sample system

발전기명	모선	에너지		에비력	발전제약	
		입찰가격데이터	입찰가격		최소	최대
G1	1	18.28	0.0082	19.428	10	100
G2	2	18.28	0.0096	19.624	20	100
G3	3	18.28	0.0059	19.519	10	150
G4	6	18.6	0.006	19.44	20	100
G5	8	18.28	0.0087	19.7416	10	120

4.2.2 수정된 IEEE 14모선 표본계통 최적화 결과

본 절에서는 상기 5모선 표본계통과 마찬가지로 IEEE 14 모선 표본계통에 대하여 발전기와 선로의 n-1 상정사고별 결과를 제시한다. 먼저 상기 데이터를 이용하여 기준계통의 에너지 최적배분에 대한 사례연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

표 13 상정사고를 고려하지 않은 경우 발전량

Table 13 Generation without contingency analysis

발전기명	모선	발전량		비용
		MW	Mvar	
G1	1	39.822	-0.627	18.933
G2	2	41.504	14.774	19.077
G3	3	86.448	19.468	19.300
G4	6	47.564	16.667	19.171
G5	8	45.000	18.549	19.063

IEEE 14모선 표본계통의 상정사고 해석을 수행한 결과 발전기-3과 선로-78과 선로-79에 사고가 발생하였을 때 실현 불가능한 해를 도출한다. 이는 모선-8에 연결된 발전기-3의 발전량이 상정사고 이전에 본 계통에서 가장 많은 발전량(85MW, 전체수요의 30%)을 출력하고 있고, 이 발전량이 선로-78과 선로-79를 거쳐 부하중심지역에 공급되고 있기 때문이다. 상기 실현 불가능한 해를 도출하는 상정사고를 제외한 나머지 발전기의 상정사고에 대한 결과는 다음과 같다.

표 14 발전기 상정사고별 각 발전기의 발전량 비교

Table 14 Comparison of generation for each generator by generator contingency

발전기명	발전기 상정사고별 오차(%)			
	발전기-1	발전기-2	발전기-4	발전기-5
G1	0.00	0.00	0.00	0.00
G2	0.00	0.00	0.00	0.00
G3	0.01	0.03	0.00	0.00
G4	0.01	0.03	0.00	0.00
G5	0.00	0.00	0.00	0.00

상기 결과로부터 5모선 표본계통과 같이 발전기의 상정사고의 경우, 본 논문에서 제안한 방법론의 결과와 실제 사고를 고려한 결과를 비교하였을 때 최대 오차가 0.03%로 거의 동일함을 알 수 있다.

다음은 각 선로별 상정사고에 대한 본 논문에서 제안한 방법론과 실제 사고를 전제한 결과를 비교한 것이다. 두 표의 결과로부터 5모선 표본계통의 결과와는 달리 선로 상정사고별 결과가 최대 5.3%에서 최소 0.3%까지 나타나게 된

다. 이는 IEEE 14모선 표본계통이 5모선 표본계통에 비해 계통의 규모가 크기 때문이며, 이는 본 논문에서 제안한 방법론을 보다 규모가 큰 계통에 적용하였을 경우에 보다 나은 해를 도출할 수 있음을 나타낸다.

다음은 5모선 표본계통 사례연구와 마찬가지로 IEEE 14모선 표본계통의 사전 주파수 제어예비력의 요구량을 도출하였다.

표 15 선로 상정사고별 각 발전기의 발전량 비교

Table 15 Comparison of generation for each generator by line contingency

From	To	선로 상정사고별 오차(%)																	
		선로-12	선로-23	선로-24	선로-15	선로-25	선로-34	선로-45	선로-56	선로-47	선로-79	선로-910	선로-611	선로-612	선로-613	선로-914	선로-1011	선로-1213	선로-1314
2	3	4.2	12.4	5.8	3.4	3.5	2.7	4.9	0.4	2.7	7.5	0.5	0.8	0.8	0.8	0.6	4.9	0.5	1.0
2	4	7.8	5.9	16.9	4.6	5.3	1.1	10.0	0.2	2.1	4.2	0.6	0.8	0.2	0.6	0.5	1.7	0.2	0.3
2	5	11.5	3.4	5.9	5.3	13.3	0.9	7.8	0.3	0.7	0.8	0.1	1.3	0.8	0.9	0.5	1.8	0.2	1.0
2	1	23.4	3.0	5.1	13.3	4.4	0.7	7.1	0.1	0.1	11.0	0.2	0.3	0.2	1.2	0.4	1.4	0.0	0.3
3	2	4.5	12.7	5.2	2.8	3.2	2.6	6.2	0.3	2.5	8.8	0.5	0.6	0.7	1.2	0.5	4.5	0.5	0.9
3	4	0.7	6.9	5.2	2.8	3.2	2.6	6.5	0.3	0.1	0.0	0.5	1.7	1.0	3.4	0.5	1.7	0.5	1.0
4	2	8.6	5.2	17.7	3.3	4.7	1.1	12.6	0.2	2.4	5.7	0.6	0.4	0.0	0.3	0.8	1.9	0.2	0.2
4	3	0.9	7.0	4.9	2.3	3.1	2.6	7.9	0.3	0.4	0.3	0.5	1.6	1.0	3.1	0.4	2.5	0.5	1.1
4	5	14.0	9.8	15.4	3.3	4.0	1.1	25.4	0.6	5.3	19.9	2.1	7.9	3.5	5.3	0.4	0.2	0.0	5.0
4	7	2.1	2.4	1.4	1.2	2.3	0.2	3.0	0.5	19.7	37.9	1.4	6.1	2.7	4.9	0.6	3.0	0.1	3.9
4	9	1.5	1.6	1.1	1.1	1.6	0.1	1.8	0.3	2.9	18.7	0.8	3.7	1.7	3.2	0.2	1.7	0.1	2.3
5	2	12.2	2.9	4.9	4.0	13.5	0.8	10.2	0.3	0.5	0.3	0.1	1.6	1.0	1.6	0.8	1.6	0.2	1.1
5	4	12.6	8.4	13.1	4.2	4.5	1.1	2.5	0.6	7.5	26.7	2.2	7.0	2.8	3.6	1.5	1.5	0.1	4.3
5	6	3.8	4.5	5.9	10.5	6.3	0.4	14.6	0.8	1.7	18.9	2.3	1.5	4.9	4.1	0.3	1.3	0.2	1.7
5	1	21.0	1.0	2.3	18.7	2.8	0.6	6.9	0.1	0.1	0.3	0.2	1.7	1.2	1.8	1.0	1.2	0.1	1.0
6	5	3.9	4.6	6.0	10.6	6.3	0.4	13.2	0.8	1.1	18.9	2.3	1.5	4.9	4.2	0.3	0.5	0.2	1.6
6	11	2.3	2.6	1.6	1.4	2.5	0.2	4.6	0.5	6.4	12.6	3.5	11.9	1.9	0.6	5.9	1.0	0.1	1.9
6	12	0.6	0.7	0.4	0.4	0.7	0.1	0.1	0.0	0.9	3.4	0.2	0.0	9.0	12.4	1.2	0.1	1.9	1.9
6	13	1.0	1.2	0.6	0.4	1.3	0.1	1.5	0.2	2.6	10.2	0.9	1.5	6.0	20.1	5.5	0.4	1.6	6.4
7	4	2.4	2.6	1.7	1.6	2.5	0.2	3.9	0.5	9.8	36.7	1.4	6.2	2.8	5.1	0.5	4.2	0.1	4.0
7	8	1.0	0.8	1.0	1.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.5	0.3	1.0	0.5	0.1	0.0	0.2
7	9	3.4	3.4	2.7	2.9	3.1	0.2	3.9	0.5	9.8	32.9	1.3	6.7	3.1	6.2	0.0	4.2	0.1	4.2
8	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	4	1.5	1.6	1.1	1.1	1.5	0.1	2.3	0.3	0.2	18.3	0.8	3.7	1.7	3.1	0.2	2.3	0.1	2.3
9	7	2.7	2.8	2.0	2.0	2.7	0.2	4.8	0.5	15.1	36.6	1.4	6.4	2.9	5.5	0.4	5.4	0.1	4.0
9	10	2.0	2.1	1.3	1.3	2.0	0.2	4.4	0.5	4.1	5.2	3.3	11.4	1.4	0.8	5.4	8.7	0.1	1.9
9	14	2.2	2.3	1.8	1.8	2.2	0.2	2.6	0.3	4.3	6.4	1.1	1.3	3.2	9.6	6.0	1.7	0.3	8.5
10	9	1.6	1.9	0.9	0.6	1.8	0.2	5.2	0.5	5.7	5.7	3.3	11.2	1.3	1.1	5.3	5.7	0.1	2.0
10	11	1.6	1.9	0.9	0.6	1.8	0.2	5.2	0.5	5.7	11.5	3.3	4.1	1.3	1.3	5.3	12.3	0.1	2.2
11	6	1.9	2.2	1.3	1.0	2.1	0.2	5.8	0.5	7.6	10.3	3.4	11.7	1.6	0.9	5.6	3.9	0.1	2.0
11	10	1.9	2.2	1.3	1.0	2.1	0.2	5.8	0.5	7.6	10.3	3.4	4.7	1.6	0.9	5.6	3.9	0.1	2.0
12	6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.8	0.1	0.1	0.0	1.1	2.3	0.2	0.1	2.9	11.6	1.1	0.3	1.9	2.0
12	13	0.7	0.8	0.6	0.7	0.8	0.1	0.1	0.0	1.1	2.3	0.2	0.1	2.9	11.6	1.1	0.3	1.9	2.0
13	6	1.4	1.6	1.1	1.0	1.5	0.1	2.1	0.2	3.3	6.2	0.9	1.2	5.6	20.5	5.1	1.2	1.5	6.5
13	12	0.7	0.8	0.6	0.6	0.7	0.1	0.2	0.0	1.2	2.1	0.2	0.1	3.4	11.0	1.1	0.5	1.9	2.0
13	14	2.1	2.4	1.7	1.6	2.3	0.2	2.3	0.3	4.6	8.3	1.1	1.2	3.3	9.5	6.2	1.7	0.3	8.5
14	9	1.9	2.1	1.5	1.4	2.0	0.2	3.0	0.3	5.2	6.9	1.1	1.4	3.1	9.0	6.1	2.7	0.3	8.2
14	13	1.9	2.1	1.5	1.4	2.0	0.2	3.0	0.3	5.2	6.9	1.1	1.4	3.1	9.0	6.1	2.7	0.3	8.2
1	2	21.9	1.5	3.1	17.8	3.1	0.6	5.5	0.1	0.0	1.3	0.2	1.4	1.0	1.1	0.8	1.4	0.1	0.9
1	5	21.9	1.5	3.1	17.8	3.1	0.6	5.5	0.1	0.0	1.3	0.2	1.4	1.0	1.1	0.8	1.4	0.1	0.9
평균오차		5.3	3.3	3.7	3.8	3.1	0.6	5.3	0.3	3.8	10.5	1.2	3.2	2.3	4.8	2.1	2.4	0.4	2.7

표 16 주파수 제어에비력 요구량 결과

Table 16 Results of requirement for frequency control reserve

발전기명	제안방법(MW)		사고를 전제한 결과(MW)	
	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}	P_g^{UP}	P_g^{DOWN}
G1	12.623	0.000	12.626	0.000
G2	0.000	0.000	0.000	0.000
G3	34.472	13.482	34.470	0.000
G4	22.589	19.261	22.588	0.000
G5	0.000	0.007	0.000	0.000

위의 결과를 살펴보면 모든 상정사고에 대해 주파수 제어 증발과 주파수 제어감발에비력 요구량이 실제 사고를 전제한 결과와 비교하였을 때 약간의 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 이는 5모선 표본계통과 마찬가지로 선로 상정사고에 대한 실제 결과와 제안한 결과의 차이에서 나타난다. 하지만 계통의 규모가 더욱 커지게 되고 발전기 수가 많아지게 되는 경우 위 오차도 상당히 줄어들 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 발전기 및 송전선로의 상정사고를 고려한 AC 조류계산 민감도를 기반으로 한 에너지와 주파수 제어에비력의 최적 급전 방법론을 제안하였다. 이를 위해 발전기와 선로에 대한 상정사고별 AC 조류계산 기반의 민감도를 도출하였고, 또한 민감도를 이용한 에너지와 주파수 제어에비력을 확보할 수 있는 최적화 방법론을 제시하였다. 제안된 방법론은 5모선 표본계통과 IEEE 14 모선 표본계통에 적용하여 사례연구를 수행하였다. 본 논문에서 제안한 최적화 방법론은 실제 결과와 비교하였을 때 발전기 상정사고의 경우 5모선 표본계통에서 오차가 0%이고, IEEE 14모선 계통에서는 최대 0.03%로 매우 정확하게 일치하였다. 또한, 송전선로의 상정사고의 경우에는 상정사고를 고려하지 않을 때의 선로의 조류량이 커짐에 따라 5모선 표본계통의 경우 최대평균오차가 30%정도이나 계통의 규모가 커지는 경우, 즉 IEEE 14모선 표본계통의 경우 최대평균오차가 5%로 정도로 나타남을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법론은 상정사고에 대해 계통데이터의 변경없이 민감도만을 이용하여 최적화 문제를 수행하기 때문에 실제 사고를 전제하였을 경우의 결과와는 차이가 발생한다. 하지만 기존의 DC 조류계산 기반의 최적화 방법론보다 좀 더 물리적으로 합당한 해를 제공할 수 있으며, 대규모 계통에 적용하게 되는 경우 상기 오차가 더욱 줄어들 것으로 판단된다. 또한 본 논문의 방법론은 상정사고에 대한 선형화된 AC 조류계산 기반의 민감도를 이용하기 때문에 n-1 상정사고 뿐만 아니라 n-2 이상의 발전기 및 송전선로의 상정사고에 대해서도 적용이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-B-112) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] H. P. Chao and H. G. Huntington, Designing Competitive Electricity Markets, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] S. Stoft, Power System Economics, IEEE, 2002.
- [3] B. Murray, Electricity Markets-Investment, Performance and Analysis, John Wiley & Sons, 1998.
- [4] M. Shahidepour, H. Yamin, and Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems-Forecasting, Scheduling, and Risk Management, IEEE, 2002.
- [5] S. Hunt and G. Shuttleworth, Competition and Choice in Electricity, John Wiley & Sons, 1996.
- [6] X. Ma, D. I. Sun, and K. W. Cheung, "Evolution toward Standardized Market Design", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18. May 2003.
- [7] M. C. Caramanis, R. E. Bohn, and F. C. Schweppe, "System Security Control an Optimal Pricing of Electricity", Elect. Power Energy Syst., Vol. 9, pp.217-224, Oct. 1987.
- [8] R. J. Kaye, F. F. Wu, and P. Varaiya, "Pricing for System Security", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, no. 3, pp. 1174-1184, Aug. 1997.
- [9] J. Kumar and G. Sheble, "Framework for Energy Brokerage System with Reserve Margin and Transmission losses", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, no. 4, pp. 1763-1769. Nov. 1996.
- [10] K. W. Cheung, P. Shamosollahi, D. Sun, J. Milligan, and M. Potishnak, "Energy and Ancillary Service Dispatch for the Interim ISO New England Electricity Market", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, no. 3, pp.968-974, Aug. 2000.
- [11] T. Wu, M. Rothleder, Z. Alaywan, and A. D. Papalexopoulous, "Pricing Energy and Ancillary Service in Integrated Market Systems by an Optimal Power Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, no. 1, Feb. 2004.
- [12] Y. Fu, M. Shahidepour, and Z. Li, "Security-Constrained Unit Commitment With AC Constraints", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, no. 2, May. 2005.
- [13] M. Madrigal and V. H. Quintanan, "A Security-Constrained Energy and Spinning Reserve Markets Clearing System Using an Interior-Point Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, no. 4, Nov. 2000.
- [14] Z. Li and M. Shahidepour, "Security-Constrained Unit Commitment for Simultaneous Clearing of Energy and Ancillary Service Market", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, no. 2, May. 2005.
- [15] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation Operation, and Control, John Wiley & Sons, 1984.

- [16] H. Yamin, S. Al-Agtash, M. Shahidepour, "Security-Constrained Optimal Generation Scheduling for Gencos", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, no. 3. Aug. 2004.
- [17] J. M. Arroyo and F. D. Galiana, "Energy and Reserve Pricing in Security and Network-Constrained Electricity Markets", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20. no. 2, May 2005.

저 자 소 개



이 기 승 (李 起 松)
 1974년 0월 0일생. 2000년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 GS칼텍스(주) 전력사업팀 근무.
 Tel : 02-2005-6241
 Fax : 02-3452-9512
 E-mail : c16021@gscaltex.co.kr



신 중 린 (慎 重 麟)
 1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.
 Tel : 02-450-3487
 Fax : 02-444-1418
 E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr



정 윤 원 (鄭 允 源)
 1977년 5월 8일생. 2002년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 02-458-4778
 Fax : 02-444-1418
 E-mail : ywjeong@konkuk.ac.kr



전 영 환 (全 瑩 煥)
 1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동경대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 홍익대 전자전기공학부 부교수
 Tel : 02-320-1620
 Fax : 02-320-1110
 E-mail : yhchun@hongik.ac.kr



박 중 배 (朴 宗 培)
 1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.
 Tel : 02-450-3483
 Fax : 02-444-1418
 E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr