

송전선로에서 발생하는 전자계 제약을 고려한 발전력의 최적 재분배

論 文
50A-10-3

An Optimal Rescheduling of Power Generation to Constrain the EM Field Emitted from Power Transmission Lines

金鍾亨* ·申明澈** ·羅浣洙*** ·朴日韓§
(Jong-Hyung Kim · Myong-Chul Shin · Wan-Soo Nah · Il-Han Park)

Abstract - Power utilities must satisfy both supplying high quality power economically and reducing EMF levels. In general, in order to reduce EMF levels from transmission line, it is effective to install shielding wires, configure wires with minimal space or modify structure of other conductors, etc., but these techniques require much cost and time. To some extent, the EMF levels associated with critical transmission lines can be reduced by redistributing the scheduled power generation, since it can change the power flows. Therefore this technique can be readily applied without modifying other structures. This paper considers the OPF (Optimal Power Flow) with the EMF constraints in transmission lines to determine the power generation redistributions and demonstrates numerically the effectiveness of the approach.

Key Words : Electromagnetic Field(EMF), Optimal Power Flow(OPF), Sensitivity Analysis

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가와 양질의 전력에 대한 욕구가 높아짐에 따라 전력계통은 보다 대형화되고 단위 전력설비는 점차 대용량화되고 있다. 아울러 전기설비에서 발생하는 전자계에 대한 사회적 또는 법적인 규제도 강화되고 있다. 따라서 전력설비의 대형화를 통한 양질의 전력공급과 설비에서 발생하는 전자계의 감소라고 하는 전기환경에 관한 문제가 양립하고 있다.

송전선로에서 발생하는 전자계의 세기를 적정수준으로 줄이기 위한 방법으로는 차폐선을 설치하거나 철탑의 높이나 구조 또는 각 상의 도체 수, 거리 및 형태 등을 변경하는 방법이 가장 일반적이면서 효과적이지만 이러한 방법들은 기존 설비들을 변경하거나 새로 신설되는 선로에 대해서 적용될 수 있으며 많은 시간과 투자를 필요로 한다. 그런데 송전선로에서 발생하는 전계 및 자계의 세기는 선로양단의 전압과 전류에 의해 직접 영향을 받기 때문에 계통망을 통해 전송되는 전력조류의 전체적인 배치에 따라 달라지므로, 전체 발전기에 대한 발전력의 재분배와 같은 전력계통에 대한 적절한 운용 및 제어를 통해 도심을 통과하는 등의 지역적으로 보다 적은 전자계 발생이 요구되는 선로들의 전자계를 적정치 이내로 유지시킬 수 있다. 특히 이 방법은 기존 설

비들을 변경하거나 추가 증설하지 않고도 상황에 따라 융통성 있게 바로 적용될 수 있다는 장점을 갖는다[1~3].

따라서 본 논문에서는 송전선로에서 발생하는 전자계의 세기를 적정 범위 내로 유지하기 위하여 전력계통의 발전력을 재분배하는 기법을 제시하고자 한다. 이를 위해 송전선로 주변에 대한 보다 정밀한 전자계 계산식을 유도하고 이것을 각 모선의 주입전력의 함수로 표현하는 감도해석(sensitivity analysis) 과정을 통해, 최소 발전비용을 목적함수로 하고 선로의 전자계를 제약조건으로 하는 최적의 발전력 재분배 문제를 정식화하였다. 그리고 14모선 모델계통에 대해 최적의 발전력 재분배를 시뮬레이션하고 그것에 따른 선로조류 및 전자계 분포의 변동을 살펴봄으로써 발전력 재분배를 통해 전자계의 발생을 제어하는 방법에 대한 효용성을 제시하였다.

2. 전자계 해석

전력계통의 발전력 분배와 선로주변 전자계 사이의 관계를 정의하기 위하여 새로운 전자계 연산식을 유도하였다.

2.1 송전 선로 모델

전자계 해석을 위하여 그림 1과 같은 3상 1회선 복도체 방식의 선로를 선정하였다.

임의의 점 p 의 전위는 영상도체를 고려하여 식(1)과 같이 표현된다[2][4][5].

$$V_p = \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{1p}}{d_{1p}} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{2p}}{d_{2p}} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{3p}}{d_{3p}} \quad (1)$$

여기서, q_a, q_b, q_c : a, b, c 상 도체의 단위길이당 전하[C/m]

* 正會員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터 工學部 博士課程

** 正會員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터 工學部 正教授 · 工博

*** 正會員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터 工學部 副教授 · 工博

§ 正會員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터 工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 3月 6日

最終完了 : 2001年 9月 11日

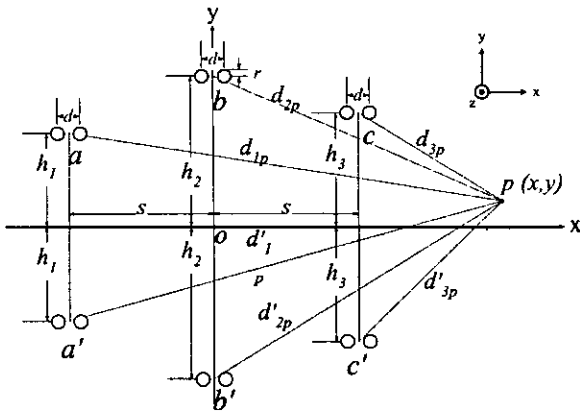


그림 1 3상 복도체 방식의 송전선로 단면
Fig. 1 Cross section of a bundled-conductor 3-φ line

또한 각 상의 대지전위 V_a, V_b, V_c 는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_1 - R}{R} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{12} - R}{d_{12} - R} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{13} - R}{d_{13} - R} \\ V_b &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{12} - R}{d_{12} - R} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_2 - R}{R} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{23} - R}{d_{23} - R} \\ V_c &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{13} - R}{d_{13} - R} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d'_{23} - R}{d_{23} - R} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_3 - R}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, R : 복도체의 기하학적 평균 반지름(GMR) $\sqrt{r \cdot d}$
각 상이 평형이라고 하면 각 상의 전하 q_a, q_b, q_c 는 식(2)로부터 식(3)과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \cdot \dot{V}_a \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1 - R}{R} & \ln \frac{d'_{12} - R}{d_{12} - R} & \ln \frac{d'_{13} - R}{d_{13} - R} \\ \ln \frac{d'_{12} - R}{d_{12} - R} & \ln \frac{2h_2 - R}{R} & \ln \frac{d'_{23} - R}{d_{23} - R} \\ \ln \frac{d'_{13} - R}{d_{13} - R} & \ln \frac{d'_{23} - R}{d_{23} - R} & \ln \frac{2h_3 - R}{R} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{\frac{4}{3}x} \\ e^{\frac{2}{3}x} \end{bmatrix}$$

식(3)을 식(1)에 대입함으로써 V_p 를 선로의 a상전압에 대한 함수로 표현할 수 있다.

그런데 선로에는 임피던스가 존재하므로 송전단으로부터 멀어질수록 일반적으로 전압과 전류는 감소하게 된다. 따라서 송전단과 수전단 사이의 각 지점에서 선로의 전압과 전류가 약간씩 다르며 전계와 자계의 세기도 달라진다. 그러므로 보다 정확한 전계 및 자계를 계산하기 위해서는 선로 전압을 송전단으로부터 거리에 대한 함수로 표현하여야 한다. 이것은 장거리 송전선로 모델로부터 정식화될 수 있다. 송전단으로부터 거리 r 만큼 떨어진 지점에서의 선로 전압 $V(r)$ 은 식(4)과 같은 2계 미분방정식으로 표현된다[6].

$$\frac{d^2 V(r)}{dr^2} - \gamma^2 \cdot V(r) = 0 \quad (4)$$

여기서, $\gamma^2 = zy, z: \Omega/\text{km}, y: \text{S}/\text{km}$

식(4)에 식(5)과 같은 경계조건을 적용하면 $V(r)$ 을 송전단 전압의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(r=0) &= \dot{V}_S \\ \dot{V}(r=l) &= \dot{V}_R \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, l : 송전단 길이, \dot{V}_S, \dot{V}_R : 송·수전단전압
송전선로가 z 축 방향으로 뻗어있다고 하면, 송전단으로부터 z 만큼 떨어진 a 상 도체의 상전압은 식(4)와 식(5)로부터 아래 식(6)과 같이 표현된다.

$$\dot{V}_a(z) = \frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_S + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_R \quad (6)$$

식(1)에 식(3)과 식(6)을 적용함으로써 결국 V_p 는 다음과 같이 송전단 전압과 z 에 종속적인 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_p &= \left[C_1 \cdot \ln \frac{\sqrt{(x+s)^2 + (h_1+y)^2}}{\sqrt{(x+s)^2 + (h_1-y)^2}} + C_2 \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + (h_2+y)^2}}{\sqrt{x^2 + (h_2-y)^2}} \right. \\ &\quad \left. + C_3 \cdot \ln \frac{\sqrt{(x-s)^2 + (h_3+y)^2}}{\sqrt{(x-s)^2 + (h_3-y)^2}} \right] \cdot \dot{V}_a(z) \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 전계 및 자계의 연산

3상 도체에 의한 점 $p(x, y)$ 에서의 전계 \vec{E}_p 는 식(7)에 대해 $-\nabla V_p$ 를 계산함으로써 구해지며 식(8)과 같이 표현된다.

$$\vec{E}_p = - \left(\frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_S + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_R \right) (A \vec{x} + B \vec{y}) \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \left[C_1 \cdot \left(\frac{x+s}{(x+s)^2 + (h_1+y)^2} - \frac{x+s}{(x+s)^2 + (h_1-y)^2} \right) \right. \\ &\quad + C_2 \cdot \left(\frac{x}{x^2 + (h_2+y)^2} - \frac{x}{x^2 + (h_2-y)^2} \right) \\ &\quad \left. + C_3 \cdot \left(\frac{x-s}{(x-s)^2 + (h_3+y)^2} - \frac{x-s}{(x-s)^2 + (h_3-y)^2} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \left[C_1 \cdot \left(\frac{h_1+y}{(x+s)^2 + (h_1+y)^2} + \frac{h_1-y}{(x+s)^2 + (h_1-y)^2} \right) \right. \\ &\quad + C_2 \cdot \left(\frac{h_2+y}{x^2 + (h_2+y)^2} + \frac{h_2-y}{x^2 + (h_2-y)^2} \right) \\ &\quad \left. + C_3 \cdot \left(\frac{h_3+y}{(x-s)^2 + (h_3+y)^2} + \frac{h_3-y}{(x-s)^2 + (h_3-y)^2} \right) \right] \end{aligned}$$

그런데 전계 \vec{E}_p 와 자계 \vec{H}_p 사이에는 식(9)와 같은 관계가 존재하므로,

$$\nabla \times \vec{E}_p = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_p}{\partial t} \quad (9)$$

자계의 세기 \vec{H}_p 는 식(10)과 같이 계산할 수 있다[1].

$$\vec{H}_p = \frac{\gamma}{\omega \mu_0} \left(\frac{\cosh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_S - \frac{\cosh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_R \right) (B \vec{x} - A \vec{y}) \quad (10)$$

식(8)과 식(10)에서 보듯이, 전자계를 선로양단 전압과 위

상각의 함수로 유도함으로써 선로를 통해 전송되는 전력조류와 선로에서 발생하는 전자계 사이의 관계를 정의할 수 있으며, 발전기 모선에 주입되는 발전력에 따라 송전선로에서 발생하는 전자계의 세기가 어떻게 변화하는지를 평가할 수 있게된다.

3. 발전력의 최적 재분배

최적조류계산(OPF) 문제는 여러 종류의 목적함수와 제약 조건들을 고려한 비선형방정식의 최적화문제로 정식화될 수 있다. 즉, 최적조류계산은 시스템에 주어지는 여러 가지 전력 및 조류 제약조건을 만족하면서 발전비용이나 손실 등의 증가를 최소화하는 최적의 해를 찾는 과정이다[7].

본 논문의 최적조류계산 문제는 최소발전비용을 만족하도록 발전력 배분이 이루어진 상태에서 최적화 문제의 제약조건으로서 선로 조류제약과 전자계 제약을 추가했을 때 그에 따라 증가되는 발전비용이 최소가 되도록 발전력을 재분배하는 것이다.

이러한 목적함수와 제약조건식들은 발전기 출력에 대한 비선형 방정식으로 표현되므로, 최적의 발전력 재분배는 조류계산 결과를 바탕으로 감도계수(sensitivity coefficient)를 구해 방정식들을 선형화하고 선형화된 그 문제의 해를 구하는 과정을 반복함으로써 이루어진다.

3.1 발전력 재분배의 정식화

발전력 재분배는 전력수급조건, 발전기출력, 선로조류, 선로의 전자계 발생 등의 제약조건 등에 의한 발전비용의 증가를 최소화하도록 이루어져야 한다.

3.1.1 목적함수

발전력 재분배의 목적함수는 다음과 같은 선형방정식으로 표현할 수 있다[1][8].

$$\text{Minimize } \Delta\text{cost} = \sum_{i=1}^{nG} C_i \Delta P_i \quad (11)$$

여기서, C_i : i 번째 발전기의 비용계수

최소발전비용을 만족하도록 각 발전기 출력이 각각 P_i 로 최적 분배된 상태에서 제약조건이 강화되거나 추가되면 필연적으로 발전비용이 증가하게된다. 따라서 발전력 재분배 문제의 목적함수는 식(11)과 같이 발전비용의 증가 Δcost 를 최소로 하는 각 발전기 출력의 변동분 ΔP_i 를 구해 새로운 P_i 를 결정하는 것이 된다.

3.1.2 제약조건

제약조건들은 식(12)~식(16)와 같이 선형화된 방정식들로 구성된다. 등호 제약조건으로서 식(12)과 같이 전력수급의 평형조건을 부여했으며,

$$\sum_{i=1}^{nG} \Delta P_i - \Delta P_{\text{loss}} = 0 \quad (12)$$

부등호 제약조건으로 다음과 같이 전계와 자계의 영향도 고려하였다.

$$\Delta P_i^{\min} \leq \Delta P_i \leq \Delta P_i^{\max} \quad i = 1, \dots, nG \quad (13)$$

$$\Delta f_l \leq \Delta f_l^{\max} \quad l = 1, \dots, nl \quad (14)$$

$$\Delta E_k \leq \Delta E_k^{\max} \quad k = 1, \dots, nc \quad (15)$$

$$\Delta H_k \leq \Delta H_k^{\max} \quad k = 1, \dots, nc \quad (16)$$

여기서,

- P_i : i 번째 발전기의 출력
- f_l : l 번째 선로를 통해 전송되는 전력
- E_k : k 번째 선로에서 발생하는 전계
- H_k : k 번째 선로에서 발생하는 자계
- nG : 발전기모선 개수
- nl : 선로 개수
- nc : 전자계 제한 선로 개수

기본적으로 전력계통의 전체 부하는 발전력 P_i 에서 선로 손실 P_{loss} 을 제외한 값이 된다. 그런데 발전력 재분배에 있어서 부하는 일정하게 두고 발전력을 조정하는 것이 때문에 전력수급조건은 식(12)와 같이 선형의 등식 제약조건으로 표현된다.

한편, 재분배된 각 발전기들은 출력 $P_i + \Delta P_i$ 이 $P_i^{\min} \leq P_i + \Delta P_i \leq P_i^{\max}$ 인 범위 내에서 있도록 운전되어야하며, 제배치된 선로조류 $f_l + \Delta f_l$ 는 선로용량 f_l^{\max} 을 넘지 않아야 한다. 이것은 각각 식(13)과 (14)로 표현할 수 있다.

식(15)와 식(16)은 각각 전계와 자계에 대한 제약조건이다. 그런데 전자계 제한이 모든 선로에 대해 이루어질 필요가 없기 때문에 도심을 관통하여 사람이나 건축물 등에 영향을 줄 수 있는 등의 몇몇 선로에 대해서만 전자계 발생 상한값을 제약조건으로 부여하였다.

3.2 감도해석(Sensitivity Analysis)

목적함수 식(11)은 제어변수 ΔP_i 의 함수이기 때문에 제약조건을 고려하여 최적화 문제를 풀기 위해서는 우선 모든 제약조건들을 ΔP_i 에 관한 형태로 표현해야한다. 즉, 발전기 출력 변동분에 대한 선로조류와 전자계의 감도계수를 구해 제약조건 식(14)~식(16)을 구성해야한다.

3.2.1 선로조류 감도 계수

전력계통을 구성하고 있는 발전기들의 출력이 변하면 계통망의 전체적인 전력의 흐름이 바뀐다. 즉, 발전기출력과 선로조류 사이의 종속적인 관계가 존재하며, 수식적으로 관계를 정의함으로써 각 선로의 조류를 제어하기 위한 각 발전기들의 출력분배를 결정할 수 있다.

Δf_l 와 ΔP_i 의 관계식은 송전단 S와 수전단 R 사이의 선로에 흐르는 유효전력 P_{S-R} 에 관한 식(17)로부터 유도될 수 있다

$$P_{S-R} = \text{Re}\{V_S \cdot I_{S-R}^*\} = g_{S-R} V_S^2 + V_S V_R (-g_{S-R} \cos(\delta_S - \delta_R) - b_{S-R} \sin(\delta_S - \delta_R)) \quad (17)$$

여기서, 선로 어드미턴스 $y_{S-R} = g_{S-R} + jb_{S-R}$

그런데 유효전력은 주로 전압위상각 δ 에 의해 결정되기 때문에 식(17)은 식(18)과 같이 위상각 δ 만의 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{S-R} &= \frac{\partial P_{S-R}}{\partial \delta_S} \Delta \delta_S + \frac{\partial P_{S-R}}{\partial \delta_R} \Delta \delta_R \\ &= -D_{S-R} \cdot \Delta \delta_S + D_{S-R} \cdot \Delta \delta_R \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $D_{S-R} = V_S V_R (b_{S-R} \cos(\delta_S - \delta_R) - g_{S-R} \sin(\delta_S - \delta_R))$

한편, 각 모선의 상태변수들 사이에는 식(19)와 같은 관계가 존재하는데,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P-\delta} & J_{P-V} \\ J_{Q-\delta} & J_{Q-V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (19)$$

발전력을 재분배하는 문제와 같이, 전체 부하는 일정한 상태에서 부하에 전력을 공급하는 발전모선의 출력을 변동시키는 경우, $\Delta Q = 0$ 이므로 위 식으로부터 $\Delta \delta$ 와 ΔV 를 다음과 같이 ΔP 만의 함수로 표현할 수 있다[1].

$$\Delta \delta = \begin{bmatrix} J_{P-\delta} & -J_{P-V} & J_{Q-V}^{-1} & J_{Q-\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \Delta P \quad (20)$$

$$\Delta V = \begin{bmatrix} J_{Q-V}^{-1} \left(-J_{Q-\delta} \right) J_{P-\delta} \end{bmatrix} \cdot \Delta P \quad (21)$$

위 식(20)을 식(18)에 대입하고 전체 선로로 확장하여 행렬식으로 정리하면 식(22)와 같다.

$$\Delta f = D \cdot \begin{bmatrix} J_{P-\delta} & -J_{P-V} & J_{Q-V}^{-1} & J_{Q-\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \Delta P \quad (22)$$

이와 같이 Δf_i 을 ΔP_i 의 함수로 정식화함으로써 선로조류 제약조건 식(14)을 고려할 수 있게 된다.

3.2.2 전계 감도 계수

발전력 재분배 문제에 전자계 제약조건이 고려되기 위해서는 마찬가지로 $\Delta \dot{E}_k$ 와 $\Delta \dot{H}_k$ 를 ΔP_i 의 함수로 표현해야 한다. 이러한 관계식은 앞서 유도한 전자계 계산식들에 대한 감도해석을 통해 각각 얻어질 수 있으며, 여기서는 편의상 식(23)과 같이 지표상의 전계 및 자계를 대상으로 했다.

그림 1에서 선로의 송전단에서 수전단으로 송전선을 따라 z 만큼 떨어진 지점에서 $p(x, 0)$ 의 전계는 식(8)로부터 다음과 같이 간단히 표현할 수 있으며,

$$\vec{E}_{S-R} = -B \cdot \left(\frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_S + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot \dot{V}_R \right) \vec{y} \quad (23)$$

송수전단 전압 \dot{V}_S, \dot{V}_R 을 극좌표 형식으로 변환하면 식(24)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{S-R} &= -B \cdot \left[\frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot V_S (\cos \delta_S + j \sin \delta_S) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot V_R (\cos \delta_R + j \sin \delta_R) \right] \vec{y} \end{aligned} \quad (24)$$

이 식에 식(25)의 관계를 적용함으로써 식(26)와 같이 송수전단 전압 및 위상각 변동에 대한 전계변동분의 관계식을 얻을 수 있으며,

$$\Delta \dot{E}_{S-R} = \frac{\partial \dot{E}_{S-R}}{\partial V_S} \Delta V_S + \frac{\partial \dot{E}_{S-R}}{\partial \delta_S} \Delta \delta_S + \frac{\partial \dot{E}_{S-R}}{\partial V_R} \Delta V_R + \frac{\partial \dot{E}_{S-R}}{\partial \delta_R} \Delta \delta_R \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{S-R} &= -B \cdot \left[\frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot (\cos \delta_S + j \sin \delta_S) \cdot \Delta V_S \right. \\ &\quad + \frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot V_S (-\sin \delta_S + j \cos \delta_S) \cdot \Delta \delta_S \\ &\quad + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot (\cos \delta_R + j \sin \delta_R) \cdot \Delta V_R \\ &\quad \left. + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot V_R (-\sin \delta_R + j \cos \delta_R) \cdot \Delta \delta_R \right] \end{aligned} \quad (26)$$

식(26)의 ΔV 와 $\Delta \delta$ 에 각각 식(20)과 식(21)을 대입함으로써 결국 $\Delta \dot{E}_k$ 와 ΔP_i 의 관계식을 얻을 수 있다.

그런데 식(24)와 (26)에서 보듯이, 전계 및 전계변동분벡터의 크기 $\dot{E}_k, \Delta \dot{E}_k$ 가 복소수이기 때문에 식(15)는 복소수의 크기를 계산해 $|\dot{E}_k + \Delta \dot{E}_k| \leq E_k^{\max}$ 와 같이 처리되어야 한다. 우선 선로S-R에서 발생하는 전계 $\dot{E}_{S-R}^{\text{new}}$ 는 식(27)과 같이 표현할 수 있으며,

$$\begin{aligned} \dot{E}_{S-R}^{\text{new}} &= \dot{E}_{S-R}^{\text{old}} + \Delta \dot{E}_{S-R} \\ &= -B \cdot \left[\frac{\sinh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot e^{j\delta_S} \cdot (V_S + \Delta V_S + jV_S \cdot \Delta \delta_S) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sinh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot e^{j\delta_R} \cdot (V_R + \Delta V_R + jV_R \cdot \Delta \delta_R) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

이 식을 실수부와 허수부로 분리하여 전계 $|\dot{E}_{S-R}^{\text{old}} + \Delta \dot{E}_{S-R}|$ 는 식(28)과 같이 나타낼 수 있으므로

$$|\dot{E}_{S-R}^{\text{new}}| = \sqrt{\text{Re}(\dot{E}_{S-R}^{\text{new}})^2 + \text{Im}(\dot{E}_{S-R}^{\text{new}})^2} \quad (28)$$

선로S-R에 대한 전계 제약조건은 식(29)와 같이 변환된다.

$$\text{Re}(\dot{E}_{S-R}^{\text{new}})^2 + \text{Im}(\dot{E}_{S-R}^{\text{new}})^2 \leq (E_{S-R}^{\max})^2 \quad (29)$$

이 식에서 보듯이, 전계 제약조건은 전계벡터의 크기가 복소수이기 때문에 ΔP_i 에 대한 다소 복잡한 형태로 표현된다.

3.2.3 자계 감도 계수

전계의 경우와 같은 방법으로 선로에서 발생하는 자계의 세기와 제약조건을 유도하면 각각 식(30)과 식(31)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{H}_{S-R}^{\text{new}} &= \dot{H}_{S-R}^{\text{old}} + \Delta \dot{H}_{S-R} \\ &= \frac{B \cdot \gamma}{\omega \mu_0} \cdot \left[\frac{\cosh(\gamma l - \gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot e^{j\delta_S} \cdot (V_S + \Delta V_S + jV_S \cdot \Delta \delta_S) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cosh(\gamma z)}{\sinh(\gamma l)} \cdot e^{j\delta_R} \cdot (V_R + \Delta V_R + jV_R \cdot \Delta \delta_R) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

$$\text{Re}(\dot{H}_{S-R}^{\text{new}})^2 + \text{Im}(\dot{H}_{S-R}^{\text{new}})^2 \leq (H_{S-R}^{\max})^2 \quad (31)$$

마찬가지로 식(30)의 $\Delta \delta$ 와 ΔV 에 식(20)과 식(21)을 대입함으로써 자계 제약조건식을 제어변수 ΔP_i 의 함수로 표현할 수 있다.

3.3 시뮬레이션 절차

선로조류제약과 마찬가지로 전자계제약을 문제에 적용하기 위해서는 목적함수와 제약조건식을 선형화하는 과정이 필요하다. 이것은 선로조류와 전자계가 P_i 의 함수로 직접 표현될 수 없기 때문이며, 선형화된 최적화문제를 반복하여 풀어서 선로조류 및 전자계제약을 만족하는 최적의 발전력 분배를 결정하게 된다.

우선 첫 번째 반복단계에서 발전력 재분배 문제의 초기값 P_i^0 을 구하기 위해 전력수급조건과 발전기출력제약조건을 적용하여 최적의 발전기출력들을 결정한다. 그리고 이것을 발전모선의 유효전력값으로 입력하여 조류계산을 수행한다. 그 결과로서 얻은 전력계통의 상태변수 값들을 바탕으로 선로조류와 전자계의 초기값 f_i^0, E_k^0 를 계산하고 P_i 에 대한 선로조류와 전자계 감도계수를 구해 목적함수와 제약조건식을 ΔP_i 에 대한 함수로 선형화한다. 그리고 그 최적화 문제를 풀어 ΔP_i^0 를 구한 다음 P_i^0 에 더해 다음단계의 P_i^1 값을 계산한다. 이 과정을 수렴될 때까지 반복함으로써 최적의 발전력 재분배를 결정한다.

전체 과정을 흐름도로 표시하면 그림 2와 같다.

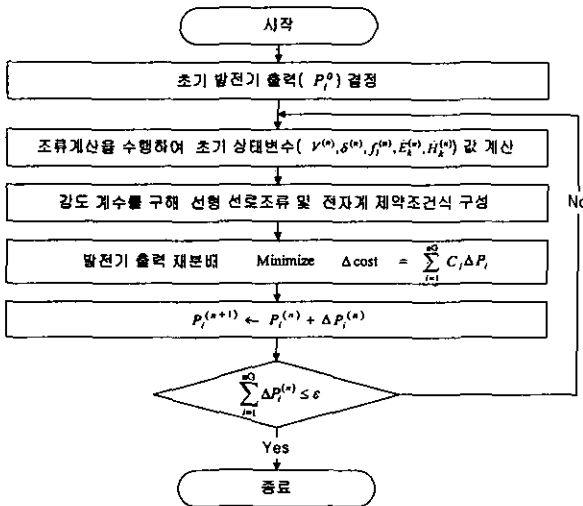


그림 2 발전력 재분배 흐름도
Fig. 2 Flowchart of generation rescheduling

발전력이 재분배됨에 따라 선로에서 발생하는 전체 전력 손실이 달라지며, 송전손실은 각 단계에서 조류계산을 통해 구한 슬랙모선의 발전력과 최적배분을 통해 계산된 슬랙모선의 발전력 사이의 차로써 구해진다. 따라서 최적 발전력 재분배 과정에서 송전손실의 영향은 부하가 손실만큼 증가한 형태로 취급하여 전력수급조건을 처리함으로써 고려될 수 있다.

4. 사례 연구

실계통은 다수의 발전기들과 모선 및 선로들로 구성되어 있고 설비에 따라 다양한 특성들을 갖기 때문에 시뮬레이션

을 위해서는 적합하지 않아 본 연구에서는 14 모선 시험계통을 선티하여 전자계 제약조건을 적용한 발전력의 최적 재분배 알고리즘을 수행하였다.

발전력 재분배 과정에서 고려되어야하는 제약조건들을 추가해가면서 추가된 제약조건에 의한 조류의 변동과 발생하는 전자계의 변동을 산출하였고, 각 경우에 대한 발전비용을 비교 검토하였다.

4.1 적용 계통

시뮬레이션을 위한 모델계통은 5대의 발전기와 20개의 선로가 연결된 14모선계통으로 구성하였고, 모든 선로는 그림 3과 같이 복도체 수평배치 1회선으로 선정하였다. 전자계 해석은 각 선로의 중간지점에서 그림 3과 같이 선로중심으로부터 $x=20[m]$ 만큼 떨어진 지표상의 점 p 에 대해 수행하였다.

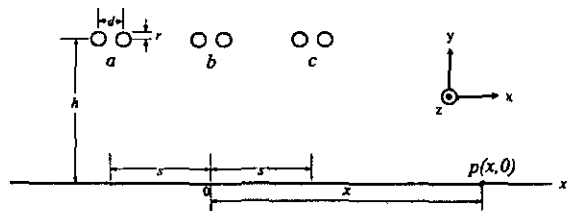


그림 3 해석대상 선로의 도체방식 및 배치
Fig. 3 conductors system and arrangement of target line

이때 선로정수를 산출하기 위해 그림 3에서 $d=0.45 [m]$, $s=6 [m]$, $h=8 [m]$ 로 정하고, 각 상의 소도체로 ACSR 1,272,000-cmil Pheasant를 사용하면 선로의 단위길이당 직렬임피던스 z 와 병렬어드미턴스 y 는 각각 다음과 같다[6][9].

$$z = 0.051 + j0.352 [\Omega/km] \quad (32)$$

$$y = j4.610 \times 10^{-6} [S/km] \quad (33)$$

그림 4는 시험 계통도이고 각 선로에 표시되어있는 숫자는 선로의 길이[km]를 나타내며, 모든 모선의 기준전압은 154[kV]로 설정했다.

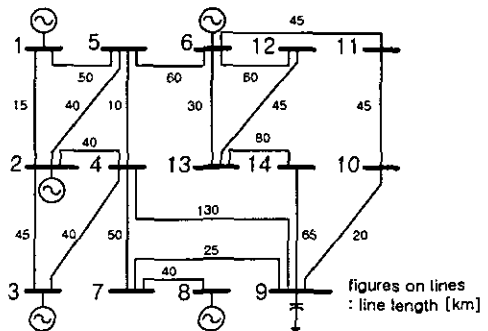


그림 4 14 모선 계통도
Fig. 4 One-line diagram of 14-bus system

각 발전기의 발전비용함수는 식(34)와 같으며, 출력은 식(35)의 범위를 갖는 것으로 상정했다[10].

$$\left. \begin{aligned} F_1(P_1) &= 245 + 5.65P_1 + 0.0059P_1^2 \text{ [$/h]} \\ F_2(P_2) &= 320 + 6.34P_2 + 0.0095P_2^2 \text{ [$/h]} \\ F_3(P_3) &= 230 + 7.37P_3 + 0.0073P_3^2 \text{ [$/h]} \\ F_6(P_6) &= 310 + 5.90P_6 + 0.0065P_6^2 \text{ [$/h]} \\ F_8(P_8) &= 180 + 8.21P_8 + 0.0065P_8^2 \text{ [$/h]} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} 50 \text{ MW} &\leq P_1 \leq 200 \text{ MW} \\ 20 \text{ MW} &\leq P_2 \leq 100 \text{ MW} \\ 0 \text{ MW} &\leq P_3 \leq 100 \text{ MW} \\ 0 \text{ MW} &\leq P_6 \leq 150 \text{ MW} \\ 0 \text{ MW} &\leq P_8 \leq 100 \text{ MW} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

모선데이터는 IEEE-14 모선 시험 계통의 것을 사용했으며 식(32)~(33)과 그림 4에서 얻을 수 있는 선로데이터와 함께 조류계산의 입력데이터로 사용하였다.

4.2 적용 사례

발전력 재분배 문제에서 사례별로 고려되는 제약조건들을 다르게 적용하면서 특정 제약조건이 추가됨에 따라 발전비용이 얼마나 증가하는지 그리고 전체적인 조류와 전자계가 어떻게 달라지는지를 확인함으로써 서로간의 관계를 살펴보았으며, 발전력 재분배가 얼마나 효율적으로 전계 및 자계를 제한할 수 있는지에 대한 타당성을 검토하였다.

제약조건들을 아래 표 1과 같이 4가지 사례별로 나누어 적용하였다.

표 1 각 사례별 제약조건

Table 1 Constraint conditions for each case

Case	고려된 제약조건	제약 대상 및 범위
사례1	· 전력수급조건 · 발전기출력 제약	· 부하 : 259 [MW] · 식(35)
사례2	· 선로조류 제약 추가	· 전체 $P_{lineflow} \leq 60$ [MW]
사례3	· 선로에서 발생하는 자계 제약 추가	· $H_{2-3}, H_{3-4} \leq 1.36$ [A/m]
사례4	· 선로에서 발생하는 전계 제약 추가	· $E_{9-14} \leq 0.7259$ [kV/m]

사례 1은 전력수급조건과 발전기출력 상한한 제약조건만을 고려하여 발전력을 분배한 경우이고, 사례 2는 사례 1의 제약조건과 모든 선로의 조류를 60[MW] 이하로 제한하기 위한 조건을 함께 고려한 경우이며, 사례 3은 여기에 선로 2-3과 선로3-4에서 발생하는 자계의 세기를 1.36[A/m] 이하로 제한하기 위한 조건을 추가한 경우이다. 마지막으로 사례 4에서는 선로9-14에 대한 전계제약까지 고려하였다.

4.3 결과 고찰

각 사례별 제약조건들을 고려한 최적의 발전력 분배를 결정하였으며, 출력분배와 그에 따른 전체발전비용 및 전력손실을 사례별로 표 2와 표 3에 각각 정리하였다.

표 2 각 사례별 발전기출력 [MW]

Table 2 Generator outputs [MW] for each case

발전기	G1	G2	G3	G6	G8
사례1	125.23	41.46	0.00	94.44	0.00
사례2	87.42	50.55	15.00	107.91	0.00
사례3	94.05	53.86	40.95	71.82	0.00
사례4	80.89	20.00	53.89	105.85	0.00

표 3 각 사례별 발전비용과 전체 손실

Table 3 Generating costs and total losses for each case

	전체 발전비용[\$/h]	전체 전력손실[MW]
사례1	2979.42	2.13
사례2	3008.56	1.89
사례3	3009.14	1.71
사례4	3026.96	1.63

표 2의 각 사례별 발전기 출력에 대해 조류계산을 수행함으로써 각 모선의 전압과 위상각을 알 수 있으며 각 선로에 흐르는 전류와 전력, 그리고 식(8), (10)으로부터 각 선로에서 발생하는 전계와 자계 등을 계산할 수 있다. 이러한 모든 선로의 유효전력, 자계세기 및 전계세기는 각 사례별로 그림 5~7을 통해 쉽게 비교할 수 있다.

사례 1은 가장 제약이 적은 경우이므로 표 2로부터 알 수 있듯이 효율 좋은 발전기에 많은 출력 분배가 이루어져서 몇몇 발전기에 집중되는 형태가 되며, 전체 발전비용이 표 3과 같이 2979.42[\$/h]로서 다른 사례에 비해 가장 경제적인 발전력 분배가 이루어짐을 알 수 있다.

사례 2는 선로제약이 추가됨으로써 발전비용은 3008.56으로 사례 1에 비해 29.14[\$/h] 증가했으며 조류가 분산됨에 따라 전체 손실이 0.24[MW] 감소했다. 또한 그림 5에서 보듯이 사례 1에서 60[MW]를 초과한 선로1-2와 선로4-5의 유효전력이 60[MW] 이하로 줄어들었음을 확인할 수 있으며, 그림 6에서 자계도 더불어 감소되었음을 알 수 있다.

사례 3은 선로2-3과 선로3-4에 대해 자계 제약을 부여함으로써 전체 발전비용은 3009.14로 사례 2에 비해 0.58[\$/h] 증가했으며 전체 손실은 0.18[MW] 감소했다. 발전비용을 약간 추가 부담함으로써 두 선로의 자계를 각각 1.4274, 1.4259[A/m]에서 1.3092, 1.36[A/m]로 비교적 광범위하게 감소시킬 수 있었다.

사례 4는 선로9-14에서 발생하는 전계를 0.7259[kV/m]로 제한한 경우이다. 사례 3에서 선로9-14의 전계는 0.72594[kV/m]인데, 이 값을 0.7259[kV/m]로 낮추기 위해 17.82[\$/h]의 발전비용이 더 요구되었다. 그림 5에서 보듯이 조류는 분산되어 전체손실은 0.08[MW] 감소되었으며, 선로9-14의 전계가 감소한 반면에 유효전력과 자계는 각각 4.08[MW], 0.07[A/m] 증가했다.

다음 그림 5~7에 각 사례별 선로조류, 자계 및 전계의 변동을 그래프로 나타내었다.

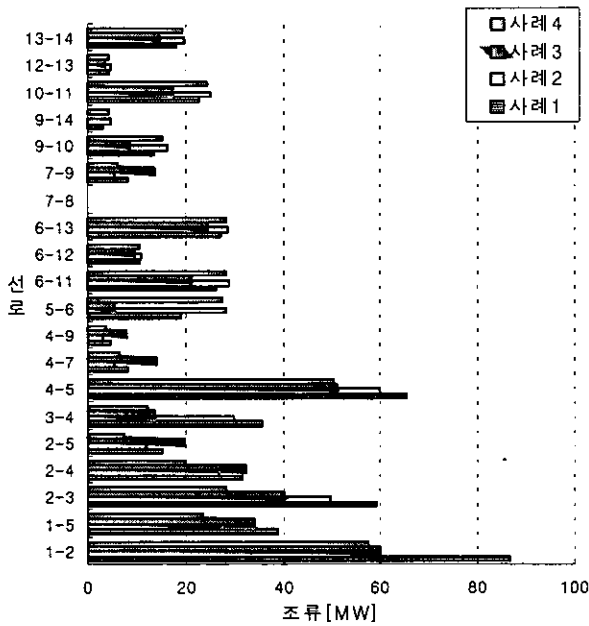


그림 5 전체 선로의 유효전력 분포
Fig. 5 Real power distribution for all lines

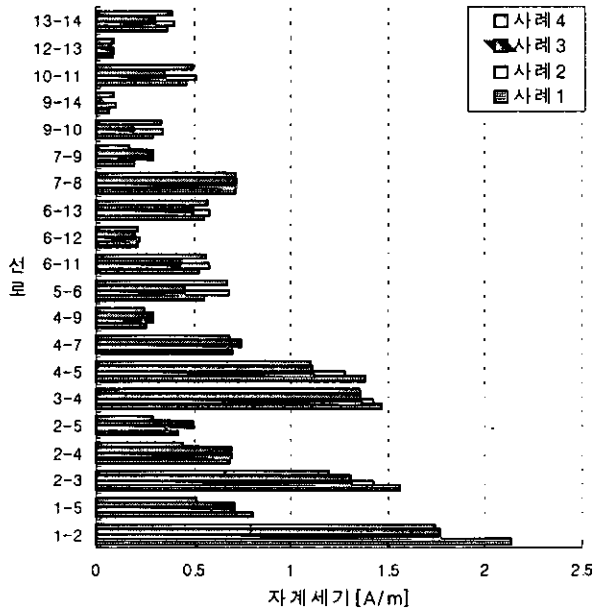


그림 6 각 선로의 자계세기 분포
Fig. 6 Distribution of magnetic fields emitted from each line

전계의 세기는 선로의 전압에 의해 결정되기 때문에 그림 7에서 보듯이 각 사례에 대해 거의 변화가 없다. 즉, 발전력 재분배에 민감하게 반응하지 않기 때문에 전계를 약간만 감소시키더라도 발전비용이 크게 증가하게 된다. 따라서 전계를 감소시키기 위한 수단으로서 발전력을 재분배하는 것은 효과적이지 못하다.

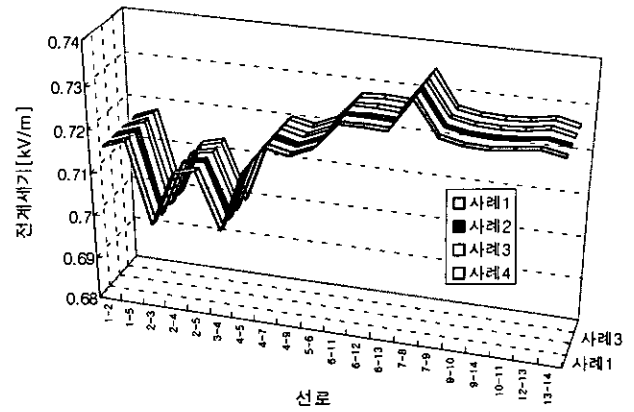


그림 7 각 선로의 전계세기 분포
Fig. 7 Distribution of magnetic fields emitted from each line

한편 선로에서 발생하는 자계와 선로조류는 모두 해당 선로의 전류에 의존하므로 그림 5와 6에서 보듯이 사례별로 비슷한 증감 비율을 나타낸다. 또한 전류는 발전력이 재분배됨에 따라 비교적 큰 변동폭을 갖고 민감하게 반응하기 때문에 사례 2와 3에서 살펴보았듯이 발전력 재분배는 자계를 감소시키기 위한 효율적인 수단이 될 수 있다.

5. 결 론

전력설비 주위의 전자기장에 관한 영향이 사회적인 문제점으로 제기되고 있을 뿐 아니라 법적인 규제도 강화되려는 상황이어서 보다 정확한 전자기장의 해석과 전자기장 저감을 위한 효율적인 방안이 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 특정지역의 기존 송전선로에서 발생하는 전자기장을 제한하고자 할 때 전력계통의 발전력을 최적 재분배함으로써 실현할 수 있는 일련의 알고리즘을 제시하였다. 이것은 전력계통의 발전력을 재분배하여 전력조류를 제어함으로써 송전선로에서 발생하는 전자계의 세기를 적정 범위 내로 유지시키도록 하는 방법이며, 이 방법의 효용성을 확인하기 위해 평행 도체방식의 3상 1회선 선로로 구성된 14 모선 시험 계통에 대해 적용해 보았다.

구체적으로, 우선 3상 선로에서 발생하는 전자계를 선로 양단의 전압과 위상각 및 거리의 함수로 표현하여 두 모선 사이 임의의 지점에서 선로 주변의 전자계를 구할 수 있도록 연산식을 유도하였으며, 전계와 자계의 변동분을 감도해석을 통해 각 발전기 모선의 주입전력 변동분 함수로 표현함으로써 선로에서 발생하는 전자계 제약을 발전력 최적 재분배 문제에 적용할 수 있도록 하였다. 그것을 바탕으로 14 모선 시험 계통에 대해 최적의 발전력 재분배 문제를 사례별로 4가지로 구분하여 전계 및 자계 제약조건을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대한 발전비용 증가를 비교 분석함으로써 약간의 발전비용 희생함으로써 선로를 물리적으로 변경하거나 설비를 추가하지 않고도 특정 선로의 전자계 세기를 줄일 수 있음을 보였다. 선로에서 발생하는 전계는 선로의 전압에 의해 결정되기 때문에 발전력 변동에 대해 거의 변화가 없지만, 특히 자계는 선로에 흐르는 전류에 의해 결정되므로 발전력을 최적으로 재분배하여 비교적 수

일하게 특정 선로의 자계를 제한하는 것이 가능함을 확인하였다. 따라서 발전계획 수립과정에서 선로의 전자계 제약을 고려하는 것은 바람직한 것으로 사료되며, 조상설비 등에 의한 조류제어를 병행한다면 보다 효율적으로 전자계의 발생을 제한할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국전력공사의 지원에 의해 기초 전력공학공동연구소 주관으로 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다. (과제관리번호 : 98510)

참 고 문 헌

[1] K. H. Abdul-Rahman, S.M. Shahidepour, and N.I. Deeb, "Effect of EMF on Minimum Cost Power Transmission", IEEE Transaction on Power Systems, Vol 10, No. 1, February 1995, pp.347-355.

[2] Y. Gao and L. Yu, "Determination of Dangerous Region of the Electromagnetic Pollution Caused by the Electric Fields around Power Line", International Conference on Communication Technology, ICCT'98, 1998, pp.S26-01-1-S26-01-4.

[3] A. R. Memari and W. Janischewskyj, "Mitigation of Magnetic Field near Power Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 11, No. 3, July 1996, pp.1577-1586.

[4] R. D. Begamudre, Extra High Voltage AC Transmission Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1986.

[5] Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition, Electric Power Research Institute, 1982.

[6] W. D. Stevenson Jr, Elements of Power System Analysis, 4th Ed, McGraw-Hill Book Company, 1988

[7] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, And Control, 2nd, John Wiley & Sons, Inc., 1986.

[8] S. Ghosh and B. H. Chowdhury, "New Implementation of The LP Algorithm for Optimal Real Power Rescheduling", Electric Machines and Power Systems, 25: 797-809, 1997.

[9] J. D. Glover and M. Sarma, Power system Analysis & Design, 2nd, PWS Publishing Company, 1993.

[10] H. Saadat, Power System Analysis, McGraw-HillBook Company

저 자 소 개



김 종 형 (金鍾亨)
 1973년 4월 29일 생. 1997년 성균관대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 박사과정



나 완 수 (羅浣洙)
 1962년 6월 14일 생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 부교수



신 명 철 (申明澈)
 1947년 4월 3일 생. 1970년 성균관대 전기공학과 졸업. 1973년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수



박 일 한 (朴日韓)
 1960년 5월 7일 생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 부교수