



혼합정수 선형계획법을 이용한 계통의 전압제어 및 안전도 평가

Voltage Control and Security Assessment of Power System Using Mixed Integer Linear Programming

김 두 현* · 김 상 철**

Doo-Hyun Kim · Sang-Chul Kim

(1998년 11월 13일 접수, 1999년 3월 18일 채택)

ABSTRACT

In this paper, a mixed-integer programming approach is presented for adjusting the voltage profiles in a power system. The advent of large-scaled system makes the reactive power and voltage problem-an attempt to achieve an overall improvement of system security, service quality and economy-more complex and seriously. Although the problem is originally a nonlinear optimization problem, it can be formulated as a mixed integer linear programming(MILP) problem without deteriorating of solution accuracy to a certain extent. The MILP code is developed by the branch and bound process search for the optimal solution. The variable for modeling transformer tap positions is handled as discrete one, and other variables continuous ones. Numerical data resulting from case study using a modified IEEE 30 bus system with outaged line show that the MILP can produce more reductions of magnitude in the operating cost. The convergence characteristics of the results are also presented and discussed.

1. 서 론

무효전력/전압 제어의 1차적인 목적은 계통의 전압을 적정한 수준으로 유지시키고, 계통의 손실이나 운전비용을 최소화하여 경제적 이익을

얻기 위한 것이고, 부차적으로 계통의 전압을 안정하게 유지시킴으로써 전력계통의 안정된 운영을 가능하게 하는 것이다. 무효전력 제어의 실패로 인한 계통의 전압 상승 및 강하는 각종 전력기기들의 절연을 파괴하여 기기들의 손상 내

* 충북대학교 공과대학 안전공학과

** 세명대학교 공과대학 산업안전공학과

지는 노화를 촉진하게 되는 등의 손실을 가져오며, 또한 계통의 안정적 운용에도 심각한 영향을 미쳐 자칫 계통을 붕괴상태로 몰고 갈 수도 있다. 지속적인 부하의 증가에 따른 송전용량의 증가가 이루어지고 있지 않고, 전력에너지의 효과적인 이용을 위한 계통의 연계등으로 인하여 이 문제는 매우 어려운 국면에 처하고 있으며, 전력계통이 대형화 및 복잡화되어 감에 따라 무효전력/전압 문제가 발생한 순간에 계통운용자가 타당한 의사결정을 내리는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 측면에서 계통운용자의 의사결정을 보조하기 위한 필요성이 절실히 요구되어 수학적 알고리즘이 이용되고 있으나, 변수의 이산성, 비선형성, 결정변수의 다양성, 변수간의 상호작용, 수리 모형화의 취약성 등으로 인하여 기존의 방법으로는 많은 어려움을 지니고 있다^{1~5)}. 또한 계통의 안전도는 그 의미를 이해하기는 쉬우나 정확하게 정의하기는 어려운 직관적인 개념이다. 전력계통의 운용에 있어서 안전도 평가의 목표라면 계통의 안전도를 개선하기 위한 조치가 요구되는 시점에서 어떠한 조치가 취해져야 하는지에 대한 충분한 정보를 제공할 수 있어야 한다. 이러한 안전도 평가에 대한 기본적인 개념은 Dy Liacco⁶⁾의 골격에 기초하고 있다. 안전도 평가를 위한 연구에서는 수리적인 알고리즘이 주로 이용되어 왔으며 이는 계통에 대한 효과를 모의하는 데에는 충분하나 그 결과를 분석하고 해석하는 데에는 미흡하다. 이러한 관점에서 볼 때 무효전력/전압 제어를 위한 합리적 해법 개발은 매우 어려우며 또한 중요한 과제이다.

본 연구에서는 전력계통의 비선형성 및 무효전력 제어를 위한 변수의 이산성에 따른 문제점을 해결하기 위하여 혼합정수 선형계획법(Mixed Integer Linear Programming; MILP)^{7,8)}을 도입하였다. 전력계통의 변압기 탭, 발전기 단자전압, 커패시터나 리액터의 스위치 등의 조작을 통하여 무효전력 재배분이 가능하며 본 연구에서는 수학적 모델링 과정에서의 지나친 복잡함을 피하기 위하여 변압기 탭만을 이산변수로 취급하였고 나머지 변수들은 연속변수로 취급하였다. 이산변수와 연속변수가 공존하는 형태의 수

학적 알고리즘으로 모델링하여 계통의 전압문제를 해결하고 계통의 안전도를 평가하고자 한다.

2. 무효전력/전압 제어 MILP

무효전력 제어 및 신뢰도 평가 분야에 대한 이론 개발 및 연구를 수행함에 있어서 계통의 특성을 올바르게 평가하기 위하여 여러 가지의 모델이 개발되어 왔다. 그러나 계통에 산재하는 여러 요인으로 인하여 대형계통에서의 효율적인 전이 가능한 모델의 개발은 아직 미흡한 실정이다. 무효전력 제어문제를 정식화함에 있어서 X를 상태변수, U를 제어변수라 할 때 일반적으로 식(1)의 형태로 표시할 수 있다. 가능하다. $f(X, U)$ 는 최적해를 구함에 있어서 목적함수이며 계통손실이나 계통운전비를 함수로 선택 가능하다. $g(X, U)=0$ 는 계통의 전력수요공급의 균형을 나타내기 위한 등호제약조건이며, $h(X, U) \leq 0$ 는 계통내의 여러 설비들이 가질 수 있는 용량에 대한 상하한치를 고려한 부등호제약조건을 의미한다.

$$\begin{aligned} \text{Min } f(X, U) & \dots\dots\dots (1) \\ \text{s.t. } g(X, U) & = 0 \\ h(X, U) & \leq 0 \end{aligned}$$

전력계통에서 무효전력을 공급하는 설비는 연속적으로 그 양을 조절할 수 있는 설비와 연속적으로 조절이 불가능한 설비로 구성되어 있다. 무효전력설비의 특성으로 발생하는 이러한 현상을 모델하기 위하여 대상 제어변수를 연속변수와 이산변수로 구별한다. 변수의 이산성으로 인한 문제의 복잡성을 해소하기 위하여 공학적인 측면에서 해의 정밀도를 해치지 않은 범위 내에서 연속변수로 모델링하여 문제를 해석하고 그 결과를 이산화시켜 적용하였다. 그러나 본 연구에서는 무효전력의 배분량이 크지 않는 경우에 무효전력의 배분을 비교적 간단하게 할 수 있는 변압기탭을 이산변수로 취급하고 나머지 변수들을 연속변수로 취급하는 혼합정수계획 문제로 수식화하였다. 무효전력 발전량, 전압치, 선로조류 및 다른 무효전력장치에 대한 제약조건하에서 최적의 전압을 유지하는 문제로서, MILP 문제로 수식화하는 과정은 참고문헌⁹⁾에

제시되어 있으며 그 결과는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2 \dots\dots\dots (2) \\ \text{s.t. } & A \cdot U_1 + B \cdot U_2 = w \\ & D \cdot U_1 + E \cdot U_2 \leq z \end{aligned}$$

U_1 는 연속변수로 발전기모선, 무효전력설비가 설치된 모선의 무효전력량을 나타내며, U_2 는 정수 값만을 가질 수 있는 이산변수로 변압기의 탭 위치를 나타낸다. 계통의 초기상태의 자료와 MILP 프로그램을 이용하여 구한 해를 바탕으로 계통의 상태를 수정하고, 새로운 계통상태자료와 MILP 프로그램에서 얻어지는 해를 구하는 반복법을 통하여 최적해에 이르게 된다. 최적해를 이용하여 최종 계통의 상태는 전력조류계산에 의하여 확인할 수 있다.

3. 안전도 평가

전력계통에서의 안전도를 평가하는 방법은 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 구분할 수 있다. 전자는 전력조류계산에 입각하여 계통에서의 일어날 수 있는 모든 사고를 해석한 후(상정사고해석)에 이들 결과에 대한 평가를 수행하고 계통의 안전도를 유지하기 위하여 적당한 대비책을 제시하는 것이다. 후자는 계통 구성요소의 비계획적 사고 발생율을 정량적으로 평가하여 얻어진 사고확율을 이용하여 평가하는 방법으로 각 사고의 서로 다른 발생가능성을 고려하지 않는 전자에 의한 평가보다 일관된 평가를 내릴 수 있다. 그러나 전자에 의한 평가 결과는 계통의 안전도를 파괴하는 사고를 정확하게 진단할 수 있으므로 본 연구에서는 전자의 방법에 의한 안전도 평가를 수행한다.

계통의 안전도를 평가하는 기본형태는 계통의 각 구성요소에 대한 상하한치에 입각한 Dy Liacco의 방법을 보완한 Fink와 Carlsen¹⁰⁾에 의하여 합리적으로 정의되어 여러 연구에서 인용되고 있다.

계통의 무효전력제어 문제는 각 모선에서의 전압을 일정 수준으로 유지하는 문제이므로 모선전압의 분포에 따른 전압안전도에 대한 평가가 이루어져야 한다. 계통의 전압분포에 따른 계통의 거동에 대한 해석은 아직까지 잘 알려져

있지 않으며, 전압안전도를 평가하는 해석적 기법도 개발되어 있지 않으며 조류계산의 발산 여부를 하나의 지표로 간주하고 있다. 본 연구에서는 계통의 전압안전도 문제를 식(3)과 같은 일종의 거리척도(Distance Measure)를 도입하여 평가한다.

$$M_{VS} = \sum_{i=0}^N W_i \cdot \Delta V_i \dots\dots\dots (3)$$

여기서 N 은 전압의 제한치를 위배하는 모선의 수, W_i 는 위배모선의 중요도, ΔV_i 는 위배모선전압과 그 모선이 위배하는 제한치와 차의 절대치를 나타낸다. 중요도를 나타내는 W_i 는 해당 모선에 전력을 공급받는 부하나 전력을 공급하는 발전기의 중요도에 따라 결정되는 인자이다. 식(3)에 의해 계산되는 값은 계통내에 위배된 전압편차의 합을 의미하므로 이 값의 크기와 전압을 위배하는 모선수중에서 어느 수치에 더 큰 비중을 두어 안전도를 평가해야 하는 것이 타당한가에 대해서는 식(3)으로는 제시할 수 없다.

4. 혼합정수계획법

모든 제어변수가 이산변수로서 정수 제약조건을 만족해야 하고 어떤 목적함수를 최적화하는 문제는 정수계획법(Integer Programming)의 문제에 해당된다. 일부 결정변수가 정수제약조건을 만족해야 하는 경우는 혼합정수계획법의 문제에 속한다. 이러한 정수계획법의 기교에는 두가지의 범주로 나누어지게 되는데 하나는 탐색법(Search Method)이고 다른 하나는 차단법(Cutting Method)이다. 탐색법은 분지한정기법(Branch and Bound Technique) 개념과 나열기법(Enumeration Technique)을 주로 이용하는데, 이는 정수해 공간이 한정된 수의 점으로 구성되어 있다는 사실에 입각하고 있다. 차단법은 주로 선형정수계획법에 이용되며, 일반적인 선형계획법 문제에서의 해가 제약조건에 의해 구성된 다각형의 꼭지점(extreme point)에 존재한다는 사실에 입각하고 있다. 본 연구에서는 선형정수계획법에 분지한정기법의 장점을 Land and Doig법^{7,8)}을 이용하여 최적해를 구하였다. 초기해 및 연속변수해를 구하기 위해 쌍대단체법

(Dual Simplex Algorithm)을 도입하였다.

5. 상정사고해석

계통에 영향을 미치는 모든 종류의 사고가 상정사고 해석시에 취급되어야하나 중요한 사고 형태의 한 종류인 선로 사고에 대해서 발생할 수 있는 문제만을 고려한다. 선로 사고는 계통에 남아 있는 송전 설비에 전력조류와 전압의 변화를 야기하므로 선로사고에 대한 해석은 이들 전력조류와 전압이 각각의 제한치 이내에 존재할 수 있을 것인가에 대해 예측할 수 있는 방법을 요구한다. 그러나, 본 연구에서는 단일 선로사고만 고려하고, 이 사고에 대해서는 선로에 과부하조류가 발생하지 않는 충분한 예비선로가 있다고 가정한다. 상정사고 해석은 계통 운용자에 의해 비정상적인 상태를 예측하기 위한 방편이므로 계산 속도와 용이성이 가장 크게 고려되어야 할 사항이다. 빠른 시간 내에 계산할 수 있는 방법으로서 직류조류 계산법이 있는데, 이 방법은 선로의 유효전력만을 고려하며, 모선 전압, 즉 무효전력 조류에 대한 영향은 무시한다. 따라서 이 방법은 유효전력에 대한 안전성 문제에만 적용이 가능한 방법으로 알려져 있다. 한편, 근래에 와서는 안전성 평가(Security Assessment) 측면에서 전압 문제가 중요한 항목으로 대두되고 있는 실정이며, 많은 연구과제의 표적이 되고 있다^{11,12)}. 이 전압문제를 고려할 수 있는 방법으로서 비록 계산시간은 많이 걸리지만 교류 조류계산 방법이 사용되고 있다. 또, 이들 방법에 대하여 좀 더 빠른 계산을 수행하기 위하여 수정 역행렬 정리를 적용하여 좋은 결과를 얻고 있다. 본 연구에서는 교류 조류계산법에 수정 역행렬 정리를 도입하여 개발한 프로그램을 사용한다.

6. 사례연구

본 연구에서 제시한 혼합정수계획법을 이용한 무효전력/전압 제어 프로그램의 효용성을 입증하기 위하여 사례연구 대상계통으로 IEEE 30 모선계통을 선정하였다. 그 결과를 제시하면 다

음과 같다.

6.1 입력자료

사례연구 대상계통인 IEEE 30 모선계통의 구성 단선도는 Fig. 1과 같다. 계통의 선로자료, 모선자료, 발전기의 발전 연료비계수 및 유효전력·무효전력 상·하한치, 변압기 탭, 무효전력 설비 모선과 각 모선전압에 대하여 필요한 제한치들에 대한 입력자료는 참고문헌¹³⁾에 제시되어 있다. 모든 전기적인량은 100 MVA를 기준으로 하여 단위(Per Unit)법으로 환산하여 표시한 값이다

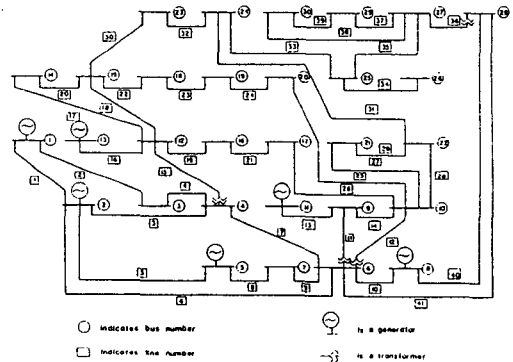


Fig. 1 One line diagram of IEEE 30 bus system

6.2 사례연구 결과

6.2.1 30번 선로가 단선된 경우

30번 선로가 단선된 경우의 계통 전압 분포도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 살펴보면 23번 모선, 26번 모선, 30번 모선에서 전압이 각각 0.945, 0.947, 0.949로서 전압의 하한치인 0.95를 벗어나고 있다. 위배된 모선들의 중요도를 1.0으로 가정하는 경우 안전도를 나타내는 평가지수 $MVS=0.009$ 를 나타내어 계통의 안전도에 심각한 문제를 유발하는 상태는 아니다. 이 경우에 계통의 손실을 최소화하면서 계통의 전압문제를 해결하기 위하여 혼합정수계획법을 이용한 프로그램에 의한 무효전력 배분의 결과는 Table 1과 같으며, Q_i 는 발전기모선, 커패시터나 리액터가 설치된 모선(i)에서의 무효전력량[Mvar]을 나타

낸다. T_i 는 계통에 설치되어 있는 i 번째 변압기의 탭 위치를 나타낸다. 이를 이용하여 계통의 무효전력을 운용한 경우의 전압 분포도를 Fig. 3에 나타내었다. 모든 모선의 전압이 제한치를 벗어나지 않으며 만족할 만한 결과를 나타낸다. Fig. 4에는 계통운전비의 최적값으로의 수렴특성을 보여준다.

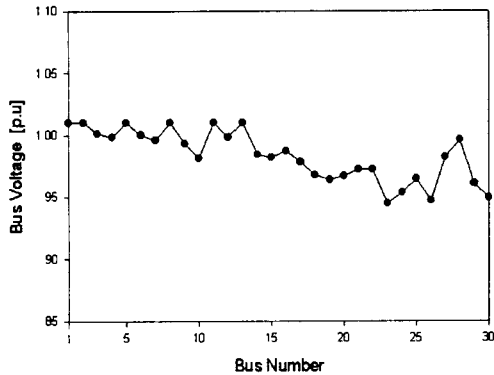


Fig. 2 Voltage profiles of a power system with line 30 outage

Table 1 Reactive power reallocation for line 30 outaged system

Variable	Reactive Power for initial state	Reactive Power for final state
Q ₁	.000	.005
Q ₂	5.063	.044
Q ₅	40.653	.217
Q ₈	35.876	.111
Q ₉	.000	.000
Q ₁₁	8.764	.074
Q ₁₃	9.252	.087
Q ₁₅	.000	.000
Q ₁₇	.000	.049
Q ₁₉	.000	.061
Q ₂₁	.000	.062
Q ₂₃	.000	.000
Q ₂₆	.000	.029
Q ₂₇	.000	.000
Q ₃₀	.000	.028
T ₁	1.000	.9750
T ₂	1.000	1.0125
T ₃	1.025	1.0125
T ₄	1.025	1.0000

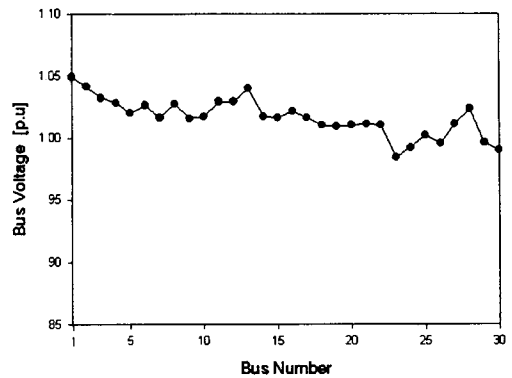


Fig. 3 Voltage profiles of a power system with line 30 outage; after reactive power is reallocated

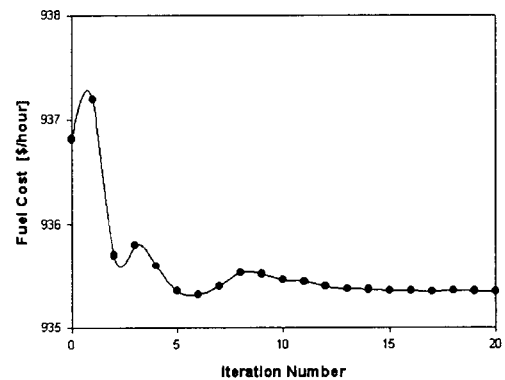


Fig. 4 Convergence characteristics of operation cost in a power system with line 30 outage

6.2.2 38번 선로가 단선된 경우

38번 선로가 단선된 경우의 계통 전압 분포도는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 살펴보면 29번 모선과 30번 모선에서 전압이 각각 0.934, 0.895로서 전압의 하한치인 0.95를 벗어나고 있다. 위 배된 모선들의 중요도를 1.0으로 가정하는 경우 안전도를 나타내는 평가지수 $MVS=0.071$ 을 나타내며 30번 선로가 단선된 경우와 비교하여 볼 때, 비록 위배된 모선의 수는 적지만 더 심각한 전압상태를 나타내고 있다. 계통의 전압문제를 해결하기 위하여 혼합정수계획법을 이용한 프로그램에 의한 무효전력 배분의 결과는 Table 2와 같으며, 음수는 리액터 설비의 무효전력량을 나타낸다. 이를 이용하여 계통의 무효전력을 운용

한 경우의 전압 분포도를 Fig. 6에 나타내었다. 모든 모선의 전압이 규정된 값을 유지하고 있으며 계통의 손실을 최소화하기 위한 전압 분포를 유지하고 있다. 계통의 모든 제약조건을 만족하면서 최소의 계통운전비로 운전하는 것이 바람직하며 최적값으로 수렴해가는 과정과 그 수렴 특성을 Fig. 7에 나타낸다.

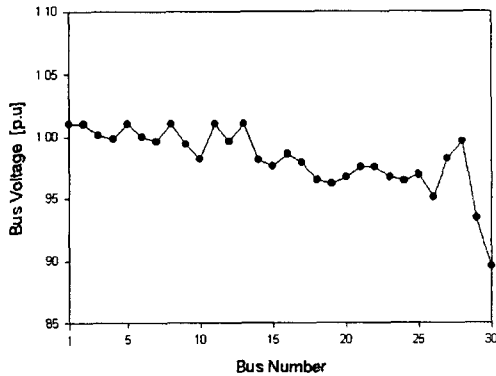


Fig. 5 Voltage profiles of a power system with line 38 outage

Table 2 Reactive power reallocation for line 38 outaged system

Variable	Reactive Power for initial state	Reactive Power for final state
Q ₁	.000	.001
Q ₂	5.222	.078
Q ₅	40.625	.224
Q ₈	35.619	.108
Q ₉	.000	-.003
Q ₁₁	8.408	.065
Q ₁₃	10.450	.137
Q ₁₅	.000	.000
Q ₁₇	.000	.062
Q ₁₉	.000	.065
Q ₂₁	.000	.055
Q ₂₃	.000	.004
Q ₂₅	.000	.027
Q ₂₇	.000	-.003
Q ₃₀	.000	.036
T ₁	1.000	.9625
T ₂	1.000	1.0250
T ₃	1.025	1.0000
T ₄	1.025	1.0125

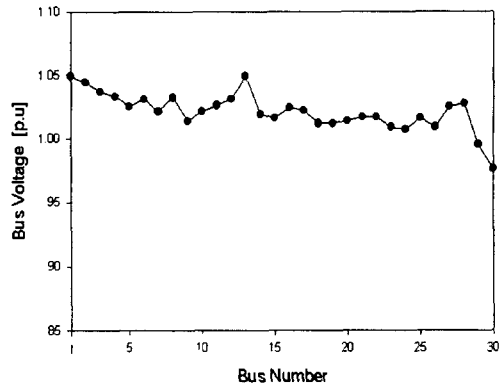


Fig. 6 Voltage profiles of a power system with line 38 outage; after reactive power is reallocated

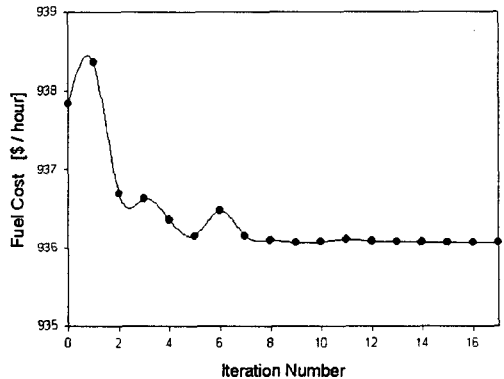


Fig. 7 Convergence characteristics of operation cost in a power system with line 38 outage

7. 결 론

본 논문은 전력계통의 전압문제를 해결하기 위하여 계통에서 이용 가능한 무효전력의 재배분을 계획함에 있어서 혼합정수계획법(MILP)을 도입한 연구이다. 무효전력/전압 제어 문제는 계통의 전압안전도 측면에서나 신뢰도 측면에서 중요한 역할을 담당하며, 합리적인 시간 이내에 최적해를 구하는 것이 바람직하다. 전술한 사례 연구를 통하여 알 수 있듯이 만족할 만한 해를 얻을 수 있었으며, 주요 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계통의 제어변수중에서 이산변수를 변압기 탭으로 설정하였고, 해의 정확도를 가능한 유지

하면서 처리할 수 있는 모델 개발 및 이를 토대로 혼합정수 계획법을 이용하여 이산적인 해를 얻을 수 있었다.

- 2) 무효전력/전압제어 문제에 있어서 상정사고를 고려하여 문제를 해석하였으며, 전압문제로 유발된 계통의 안전도를 나타낼 수 있는 지수를 도입하였다.
- 3) 본 연구에서 개발된 최적화기법을 이용한 무효전력/전압 제어 알고리즘, 상정사고 프로그램등은 계통해석시에 다른 분야에서 독립적인 적용이 가능하다.

이상과 같이 본 논문은 혼합정수계획법(MILP)을 도입하여 무효전력/전압 제어 문제를 해결하고자 하였다. 제시된 방법에 의하여 얻어지는 변압기탭에 대한 이산적인 해는 반올림/내림 등의 조작을 하지 않고도 적용이 가능하다. 그러나 실제 시스템에서의 변압기탭에 의한 무효전력의 배분을 위해서는 제어장치 및 제어방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) Y.M. Park, D.H. Kim, et al, "Optimal Real and Reactive Power Operation Using P,Q Decomposition in Steady State", Proc. of CIGRE, Bangkok, Thailand, Nov.,1989.
- 2) A. Venkataramana, J. Carr, R.S. Ramshaw, "Optimal Reactive Power Allocation", IEEE Vol. PWRS-2, No. 1, February, 1987.
- 3) K.R.C. Mamandur and R.D. Chenoweth, "Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, July, 1981.
- 4) J. Qie and S.M. Shahidehpour, "A New Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile", IEEE, Vol. PWRS-2, No. 2, May, 1987.
- 5) A. Monticelli, M.V.F. Pereira, and S. Granville, "Security-constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling", IEEE, Vol. PWRS-2, No. 1, pp. 175~182, February, 1987.
- 6) T.E. DyLiacco, "The Adaptive Reliability Control System", PAS-86, pp.517~531, May, 1967.
- 7) Hamdy A. Taha, "Integer Programming-Theory, Application, and Computations", Academic Press, 1975.
- 8) Harvey M. Salkim and Kamlesh Mathur, "Foundations of Integer Programming", North-Holland, 1989.
- 9) Y.M. Park, D.H. Kim, J.C. Kim, "Optimal Reactive Power and Voltage Control Using A Matrix Decomposition Method", Transactions of KIEE, Vol. 39, No. 3, March, 1990.
- 10) L.H. Fink and K. Carlsen, "Operating Under Stress and Strain", IEEE Spectrum, Vol. 15, No. 3, pp. 48~53, March, 1978.
- 11) K.T. Khu, M.G. Lauby, D.W. Bowen, "A Fast Linerarization Method to Evaluate The Effect of Circuit Contingencies Upon System Load Bus Voltage", IEEE Transactions on Vol. PAS-101, No. 10. October, 1982.
- 12) F. Albuyeh, A. Bose, B. Heath, "Reactive Power Consideration in Automatic Contingency selection", IEEE Transactions on Vol. PAS-103, January, 1984.
- 13) Y.M. Park, D.H. Kim, "A Knowledge Based System for Reactive Power/Voltage Control Based on Pattern Recognition and Set of Indices", Transactions of KIEE, Vol. 40, No. 8, August, 1991.