



(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。 Int. Cl.
H02J 3/38 (2006.01)

(11) 공개번호 10-2007-0033494
(43) 공개일자 2007년03월27일

(21) 출원번호 10-2005-0087707
(22) 출원일자 2005년09월21일
심사청구일자 2005년09월21일

(71) 출원인 고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자 이병준
서울특별시 성북구 안암동5가 1번지 고려대학교 전기공학과
서상수
서울특별시 성북구 안암동5가 1번지 고려대학교 전기공학과

(74) 대리인 김정식

전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 전력 선로 안정화 방법, 및 상기 방법을 실행시키기 위한컴퓨터 판독 가능한 프로그램을 기록한 기록 매체

(57) 요약

전력 선로 전압 안정화 방법, 및 상기 방법을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한 프로그램을 기록한 기록 매체가 개시된다. 전력 선로 전압 안정화 방법은 컴퓨터가 전력 계통상의 목적하는 사고 선로의 정보를 입력받는 단계, 전력 계통의 정보를 독출하는 단계, 사고 선로의 선로 정수를 사고 영향을 반영하기 위한 파라미터를 포함하는 사고 선로 정수로 대체하여 파라미터와 전력 계통상의 선로 전압과의 관계를 산출하는 단계, 파라미터가 사고 선로의 사고에 대응하는 사고 파라미터 값을 가질 때 선로 전압의 해가 존재하지 않는 경우, 선로 전압이 해를 가지는 파라미터 값 중 사고 파라미터 값에 가장 가까운 임계 파라미터 값을 산출하는 단계, 임계 파라미터 값에서 파라미터에 대한 전력 계통상의 모선들의 상대 감도를 산출하는 단계, 및 모선들의 식별 정보 및 상대 감도 정보를 포함하는 취약 모선 정보를 출력하는 단계를 포함한다.

대표도

도 2

특허청구의 범위

청구항 1.

컴퓨터가 전력 계통상의 목적하는 사고 선로의 정보를 입력받는 단계;

상기 전력 계통의 정보를 독출하는 단계;

상기 사고 선로의 선로 정수를 사고 영향을 반영하기 위한 파라미터를 포함하는 사고 선로 정수로 대체하여 상기 파라미터와 상기 전력 계통상의 선로 전압과의 관계를 산출하는 단계;

상기 파라미터가 상기 사고 선로의 사고에 대응하는 사고 파라미터 값을 가질 때 상기 선로 전압의 해가 존재하지 않는 경우, 상기 선로 전압이 해를 가지는 파라미터 값 중 상기 사고 파라미터 값에 가장 가까운 임계 파라미터 값을 산출하는 단계;

상기 임계 파라미터 값에서 상기 파라미터에 대한 상기 전력 계통상의 모선들의 상대 감도를 산출하는 단계; 및

상기 모선들의 식별 정보 및 상기 상대 감도 정보를 포함하는 취약 모선 정보를 출력하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 전력 선로 전압 안정화 방법.

청구항 2.

제 1항에 있어서,

상기 사고 선로 정수는 선로 정수에(1 파라미터)를 곱하는 형식으로 파라미터를 포함하는 것을 특징으로 하는 전력 선로 전압 안정화 방법.

청구항 3.

제 2항에 있어서,

상기 선로 정수는 어드미턴스인 것을 특징으로 하는 전력 선로 전압 안정화 방법.

청구항 4.

제 1항에 있어서,

상기 파라미터와 선로 전압과의 관계는 국부적인 파라미터화 기법을 이용한 확대 자코비안을 통해 산출하는 것을 특징으로 하는 전력 선로 전압 안정화 방법.

청구항 5.

제 1항에 있어서,

상기 상대 감도는 자코비안 행렬의 법선 벡터를 이용한 감도 해석을 통해 수행하는 것을 특징으로 하는 전력 선로 전압 안정화 방법.

청구항 6.

제 1항에 있어서,

상기 모선 정보에 따라 상기 파라미터의 임계값을 변화시키기에 가장 효과적인 모선에 전압 안정화 조치를 수행하기 위한 제어 신호를 출력하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 전력 선로 전압 안정화 방법.

청구항 7.

제 1항 내지 6항 중 어느 한 항의 방법을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한 프로그램을 기록한 기록 매체.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 전력 선로 전압 안정화 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 전력 조류 방정식의 해가 존재하지 않는 가혹한 사고에서도 전압 안정화 조치를 수행하기 위한 취약 모선을 선정하는 방법에 관한 것이다.

최근 우리나라 전력계통은 송전 전력의 증대, 경제적 환경적인 문제로 인한 송전계통 확충의 어려움 등의 이유로 계통 운전 조건이 점차 한계점에 다다르고 있다.

계통 계획 측면에서 이에 대응하기 위한 경제적이고 적절한 송전 계통 확충 계획의 수립이 요구되는 동시에 계통이 한계점 근처에서 운용될 때 사고 발생 시 유발되는 치명적인 위험성을 제거하고 안전한 계통 운영을 보장하기 위해 계통 운영계획 측면에서 다양한 상정사고에 대한 안정도 평가(Security Assessment)가 반드시 수행되어야 한다.

특히, 한계점 근처에서의 계통 운용일수록 조류해를 갖지 않는 심각한 상정 사고가 더 많이 존재하므로 이러한 안정도 평가는 더욱 중요한 의미를 가진다. 또한, 계통 규모가 커지고 복잡할수록 전압 안정도(voltage stability) 측면에서의 계통 붕괴(system collapse) 및 국지적인 전압 불안정 현상이 더욱 심각한 문제로 대두된다. 따라서 계통의 전압 안정도를 평가하고 안정성 향상 방안을 마련하는 것은 계통의 안전한 운영을 위해 매우 중요한 일이다.

계통의 전압 안정도 평가에 일반적으로 적용되는 지수(index)에는 유효 전력 여유(Active power margin)와 무효 전력 여유(Reactive power margin) 그리고 용통 조류 여유(Flow margin)가 있다.

이 중에서 전압 안정도 관점에서 취약 지역을 선정할 수 있는 지수는 무효 전력 여유가 있지만 계통의 상태나 해석 지역의 부하 수준에 의하여 변동하는 등의 임의성을 포함하고 있다. 또한, 조류 계산의 해가 수렴하지 않는 가혹한 상정 사고에 있어서 취약 지역을 산정할 수 없는 단점이 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명은 상기 종래의 문제점을 해결하기 위해 안출된 것으로서, 전력 조류 계산의 해가 수렴하지 않는 가혹한 상정 사고에 있어서 취약 지역을 산정할 수 있는 전력 선로 전압 안정화 방법 및 상기 방법을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한 프로그램이 기록된 기록 매체를 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

발명의 구성

상술한 목적을 달성하기 위해 본 발명에 따른 전력 선로 전압 안정화 방법은 컴퓨터가 전력 계통상의 목적하는 사고 선로의 정보를 입력받는 단계, 전력 계통의 정보를 독출하는 단계, 사고 선로의 선로 정수를 사고 영향을 반영하기 위한 파라미터를 포함하는 사고 선로 정수로 대체하여 파라미터와 전력 계통상의 선로 전압과의 관계를 산출하는 단계, 파라미터가 사고 선로의 사고에 대응하는 사고 파라미터 값을 가질 때 선로 전압의 해가 존재하지 않는 경우, 선로 전압이 해를 가지는 파라미터 값 중 사고 파라미터 값에 가장 가까운 임계 파라미터 값을 산출하는 단계, 임계 파라미터 값에서 파라미터에 대한 전력 계통상의 모선들의 상대 감도를 산출하는 단계, 및 모선들의 식별 정보 및 상대 감도 정보를 포함하는 취약 모선 정보를 출력하는 단계를 포함한다.

선로 정수에 파라미터를 포함시키고, 임계 파라미터 값에서 모선들의 상대감도를 산출하는 구성으로 전력 조류 방정식의 해가 존재하지 않는 가혹한 사고에서도 전압 안정화를 위한 취약 모선을 선정할 수 있게 된다.

사고 선로 정수는 선로 정수에(1 - 파라미터)를 곱하는 형식으로 파라미터를 포함할 수 있으며, 선로 정수는 어드미턴스일 수 있다.

또한, 파라미터와 선로 전압과의 관계는 국부적인 파라미터화 기법을 이용한 확대 자코비안을 통해 산출할 수 있다.

확대 자코비안은 전력 조류 자코비안이 특이성을 갖더라도 확대 자코비안은 특이성을 극복할 수 있으므로, 선로 정수 연속 조류 계산으로 작성된 선로 전압과 파라미터 곡선은 임계점에서 해의 발산 문제가 존재하지 않도록 하며, 국부적인 파라미터화 기법은 확대 자코비안의 마지막 행이 소성을 갖고 있어 역행렬을 구하기 위한 행렬 분해시 생성항의 발생을 줄이려는 선행 작업이 필요 없게 한다.

상대 감도는 자코비안 행렬의 법선 벡터를 이용한 감도 해석을 통해 수행할 수 있다. 이로써, 선로 정수 파라미터의 감도는 해당 제어 파라미터 모선의 영좌고유벡터 성분의 상대적인 크기로 결정되어 단순히 영좌고유벡터 성분 크기를 비교하여 파라미터에 대한 모선들의 상대적인 감도를 구해낼 수 있다.

모선 정보에 따라 파라미터의 임계값을 변화시키기에 가장 효과적인 모선에 전압 안정화 조치를 수행하기 위한 제어 신호를 출력하는 단계를 더 포함할 수 있다.

아울러, 상기 방법 발명을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한 프로그램을 기록한 기록 매체 발명이 청구된다.

이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명한다.

도 1은 본 발명에 따른 전력 선로 안정화 방법의 일 실시예가 수행되는 시스템의 개략적인 블록도이다.

사용자 단말(100)은 사용자로부터 사고를 상정할 선로를 입력받고, 전력 계통의 선로 전압을 안정화시킬 수 있는 취약 선로를 선정한다. 전력 회사 서버(200)는 전력 계통(300)의 상태를 감시하고, 전력 계통의 정보를 저장한다. 전력 안정화 조치부(400)는 전력 회사 서버(200)의 명령에 따라 전력 계통 선로 전압의 안정화 조치를 수행한다.

도 2는 본 발명에 따른 전력 선로 안정화 방법의 일 실시예를 수행하기 위한 개략적인 흐름도이다.

먼저, 사용자 단말(100)이 전력 계통상의 목적하는 사고 선로의 정보를 입력받는다(S110). 사용자 단말(100)은 자체 내의 저장 장치 또는 전력 회사 서버(200)로부터 전력 계통의 정보를 독출한다(S120).

이어서, 사용자 단말은 상기 사고 선로의 선로 정수를 사고 영향을 반영하기 위한 파라미터를 포함하는 사고 선로 정수로 대체하여 파라미터와 전력 계통상의 선로 전압과의 관계를 산출한다(S130).

일반적인 연속조류계산(CPF, continuation Power Flow)은 예측과정(Predictor)과 수정과정(Corrector)으로 이루어져 있다. 즉, 연속조류계산은 기본 조류해를 계산할 수 있다는 가정하에 있다. 그러나 계통이 해를 갖지 않는 영역에 존재한다면 조류 계산은 계통 해석을 수행할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위하여, 상정사고 시 선로정수 임피던스 변화에 따라 조류해의 경로를 추적하는 선로정수 연속조류계산을 사용한다.

상정사고 시 선로정수 임피던스 변화를 고려하기 위하여, 선로정수를 파라미터화 하여, 전력 조류 방정식을 재구성한다. 도 3은 모선 i와 j에 연결된 선로를 형 등가회로로 나타내었다.

선로정수 어드미턴스 값의 크기 조정을 위해 파라미터()를 적용선로의 직렬 및 병렬 어드미턴스에 (1-v)를 곱하여 v가 0일 경우는 정상상태를 v가 1일 경우는 상정사고 후의 선로 탈락을 표현한다. 모선 i에서의 파라미터(v)가 도입된 전력 조류 방정식은 다음 식과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned}
 0 = & |V_i|^2 G_{ii}^{new} \\
 & + |V_i| \sum_{\substack{l \in L(i) \\ l \neq j}} |V_l| [G_{il} \cos(\theta_{il}) + B_{il} \sin(\theta_{il})] \\
 & + |V_i| |V_j| [G_{ij}^{new} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij}^{new} \sin(\theta_{ij})] \\
 & + P_{ij}(V_i, V_j, v) - P_i^{inj}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 0 = & |V_i|^2 B_{ii}^{new} \\
 & + |V_i| \sum_{\substack{l \in L(i) \\ l \neq j}} |V_l| [G_{il} \sin(\theta_{il}) - B_{il} \cos(\theta_{il})] \\
 & + |V_i| |V_j| [G_{ij}^{new} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij}^{new} \cos(\theta_{ij})] \\
 & + Q_{ij}(V_i, V_j, v) - Q_i^{inj}
 \end{aligned} \quad (2)$$

where,

$$\begin{aligned}
 P_{ij}(V_i, V_j, v) = & (1-v) \{ |V_i|^2 G_{ii}^{br} \\
 & + |V_i| |V_j| [G_{ij}^{br} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij}^{br} \sin(\theta_{ij})] \}
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 Q_{ij}(V_i, V_j, v) = & (1-v) \{ -|V_i|^2 B_{ii}^{br} \\
 & + |V_i| |V_j| [G_{ij}^{br} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij}^{br} \cos(\theta_{ij})] \}
 \end{aligned} \quad (4)$$

선로정수를 파라미터화한 수정된 전력 조류 방정식을 연속 알고리즘에 적용할 경우, 선로 정수 파라미터(v)를 상태변수로 포함시킨 확대 자코비안을 이용한다. 선로 정수 연속 조류계산에 이용된 n 모선계통의 확대 자코비안은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 J_A = & \begin{bmatrix} \partial \underline{P}_T / \partial \delta & \partial \underline{P}_T / \partial V & \partial \underline{P}_T / \partial v \\ \partial \underline{Q}_T / \partial \delta & \partial \underline{Q}_T / \partial V & \partial \underline{Q}_T / \partial v \\ \underline{e}_k \end{bmatrix} \\
 \underline{P}_T \in R^{n-1}, \underline{Q}_T \in R^{n-npv-1}
 \end{aligned} \quad (5)$$

기존 자코비안의 행과 열에 한 줄씩 추가되어 전력 조류 자코비안이 특이성(Singularity)을 갖더라도 확대 자코비안은 특이성을 극복할 수 있으므로, 선로정수 연속조류계산으로 작성된 v-V 곡선은 임계점에서 해의 발산 문제가 존재하지 않는다.

확대 자코비안에서 볼 수 있듯이, 연속 알고리즘의 예측과정과 수정과정에는 본래의 식에 하나의 식을 덧붙이는 파라미터화 과정이 필요하다. 본 실시예에서는 국부적인 파라미터화 기법(Locally Parameterization)을 이용하고 있다.

국부적인 파라미터화 기법은 기존의 문헌에 언급된 Flueck 등이 사용한 호길이 파라미터화 기법(Arclength Parameterization)에 비교하여 확대 자코비안의 마지막 행이 비영요소가 채워져 있지 않으므로, 자코비안의 마지막 행이 소성을 갖고 있어 역행렬을 구하기 위한 행렬 분해(Matrix Decomposition)시 생성항(Fill-in)의 발생을 줄이려는 선행작업이 필요 없는 장점이 있다.

이어서, 조류 계산 수렴을 위한 취약지역 선정한다. 이를 위해, 선로정수 연속조류계산을 사용하여 선로 사고시 선로 전압이 해를 가지는 지를 판별하여(S140) 가혹한 상정 사고를 선별하고, 선로정수 파라미터의 임계점을 산출하여(S150) 임계점에서 감도해석을 수행하여(S160) 취약 지역을 선정한다.

일반적인 전력조류계산에서 이용되는 뉴턴-랩슨법의 비수렴 원인은 전력 조류 자코비안이 특이성을 갖는 경우(III-Condition)와 조류해의 초기 추정값이 수렴 영역 밖에 존재하는 경우(Bad Initial Guess), 해가 존재하지 않는 경우(Unsolvable)로 나눌 수 있다. 그러나 강건한 수렴성을 갖는 연속 알고리즘을 적용하면 자코비안의 특이성으로 인한 문제는 해결된다. 그리고 선로정수 연속조류계산을 사용하면 뉴턴-랩슨법의 초기 추정값이 수렴영역 밖에 존재하여 발산하는지 혹은 실제 해가 존재하지 않는지를 판별할 수 있다.

도 4는 상정 사고 전 정상상태에서부터 사고 후의 상태까지 선로정수 연속조류계산을 이용하여 v -V 곡선을 나타내었다.

도 4에서 보면, case1과 같이 v-V 곡선의 선로정수 파라미터 임계값이 1이 넘는 경우에는 상정 사고 후 (=1) 모선의 전압이 변하긴 하지만 그 점에서의 조류해가 존재한다. 그러나 case2와 같은 사고에서는 상정사고 후(=1) 조류해가 존재하지 않아 사고 후 불안정점을 지나 계통이 발산하는 경우로 판단할 수 있다. 이렇게 v-V 곡선의 임계값이 1이 되지 않는 상정 사고가 가혹한 상정 사고로 선별된다.

선별된 가혹한 상정사고에 대하여 v-V 곡선의 임계점에서 감도해석을 수행하여 취약 지역을 선정한다. 이를 위해, 모선들의 상대 감도를 산출한다(S160). 본 실시예에서는 감도해석 방법으로 자코비안 행렬의 법선벡터(Normal Vector)를 사용하였다.

계통 방정식을 f로 하고, x를 상태변수, p를 제어 파라미터로 할 때, 선로정수 파라미터를 적용한 계통 방정식은 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$f(x, \nu, p) = 0 \quad (6)$$

$$(f \in R^{2n}, \nu \in R^1, p \in R^m)$$

이때 제어 파라미터에 대한 선로정수 파라미터의 감도는 식 (6)을 미분하여, 식 (7)의 양변에 영좌고유벡터(Zero Left Eigenvector)를 곱하여 구하게 된다.

$$-f_p dp = f_\nu d\nu \quad (7)$$

$$(f_p \in R^{2n \times m}, dp \in R^{m \times 1}, f_\nu \in R^{2n \times 1}, d\nu \in R^{1 \times 1})$$

문헌상에 언급된 것처럼, 영우고유벡터(Zero Right Eigenvector)는 전압 불안정점에서의 상태변수들이 초기 변화를 나타내어 전압붕괴 시 상태변수들의 벡터적인 변화 방향을 의미하며, 영좌고유벡터는 파라미터 평면에서 조류해가 존재하는 지역과 존재하지 않는 지역과의 경계면과 수직을 이루어 법선벡터의 의미를 가지게 되어 영우고유벡터의 방향, 즉 붕괴의 방향으로 투영하는 의미를 지닌다. 파라미터 평면상에서 붕괴의 방향으로 투영한 효과를 가지는 f_x 의 영좌고유벡터를 위 식의 양변에 곱하여 i번째 제어 파라미터에 관하여 정리하면 식 (8)과 같이 된다.

$$\frac{\partial \nu}{\partial p_i} = -v^T f_{pi} / v^T f_\nu \quad (8)$$

$$(\frac{\partial \nu}{\partial p_i} \in R^{1 \times 1}, v^T \in R^{1 \times 2n}, f_{pi} \in R^{2n \times 1})$$

여기서 우변의 분모는 m개의 제어 파라미터에 대해서 모두 동일한 스칼라 값($v^T f_\nu \in R^{1 \times 1}$)을 가지며, 분자의 f_{pi} 는 어떤 제어 모선에서 같은 상수 값을 갖는 열벡터가 된다. 즉, 제어 모선인 i 모선에 해당하는 성분이 모두 동일한 값을 가지고 나머지 성분이 모두 0이므로, 결국 m개의 제어 파라미터에 대하여 선로정수 파라미터의 감도는 해당 제어 파라미터 모선의 영좌고유벡터 성분의 상대적인 크기로 결정되어 단순히 영좌고유벡터 성분 크기를 비교하여 파라미터에 대한 모선들의 상대적인 감도를 구해낼 수 있다. 그러므로 가장 큰 법선벡터 성분을 가지는 모선이 v-V 곡선에서 선로정수 파라미터의 임계값을 변화시키는데 효과적인 모선의 위치가 된다.

마지막으로, 취약 모선 정보를 출력 장치를 통해 출력한다(S170). 취약 모선 정보는 취약 모선의 식별 정보 및 상대 감도 정보를 포함할 수 있다. 상대 감도 정보는 명시적으로 수치로 표현될 수도 있지만, 취약 모선의 배열 순서로 표현될 수도 있다.

또한, 도 2에 도시되지는 않았지만, 사용자 단말(100)은 전력 안정화 조치부(400)로 취약 모선에 전압 안정화 조치를 수행하기 위한 제어 신호를 출력할 수 있다. 전력 안정화 조치부(400)는 자동화된 기계 설비일 수 있으며, 전압 안정화 조치는 무효 전력의 공급과 같이 당업자가 고려할 수 있는 다양한 조치일 수 있다.

본 발명에서는 선로탈락 사고 후에 계통이 운전점을 잃는 가혹한 상정 사고의 경우, 조류해의 solvability를 확보하기 위한 취약지역을 선정하는 방안을 제시하였다. 기존의 방법은 무효전력 여유(Reactive Power Margin) 해석을 통하여 취약 모선을 산정하였지만 이 방법은 조류계산이 수렴하는 상정 사고의 경우에서만 가능하다는 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 선로정수 연속조류계산을 이용하여 임계점에서의 감도해석을 통한 취약지역 산정방안을 제시하였다.

발명의 효과

본 발명에 의해 조류해가 존재하지 않는 가혹한 상정 사고에서 전압 안정도 측면의 취약 지역 선정시 선로정수 연속 조류계산을 이용하여 파라미터와 선로 전압과의 곡선의 꼭지점에서 모선 감도 정보를 사용하여 취약지역을 선정할 수 있게 된다.

종래에는 조류계산이 수렴하지 않는 가혹한 상정 사고의 경우에 있어서는 취약지역을 선정하는 방안이 없었으나, 선로정수 연속조류계산을 이용한다면 취약지역을 선정하는 좋은 지표가 될 수 있다.

본 발명이 비록 본 발명의 일부 바람직한 실시예에 의해 설명되었지만, 본 발명의 범위는 이에 의해 제한되어서는 아니 되고, 청구 범위에 의해 뒷받침되는 상기 실시예의 변형이나 개량에도 미쳐야 할 것이다.

도면의 간단한 설명

도 1은 본 발명에 따른 전력 선로 안정화 방법의 일 실시예가 수행되는 시스템의 개략적인 블록도.

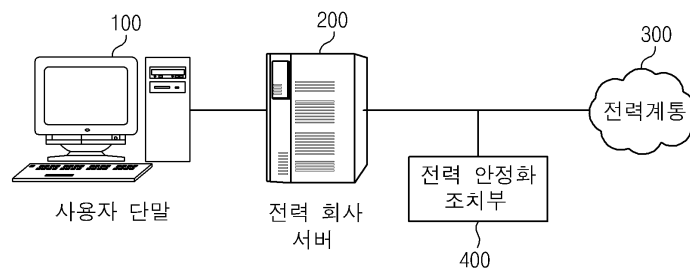
도 2는 본 발명에 따른 전력 선로 안정화 방법의 일 실시예를 수행하기 위한 개략적인 흐름도.

도 3은 상정 사고의 선로 정수를 파라미터화한 등가회로.

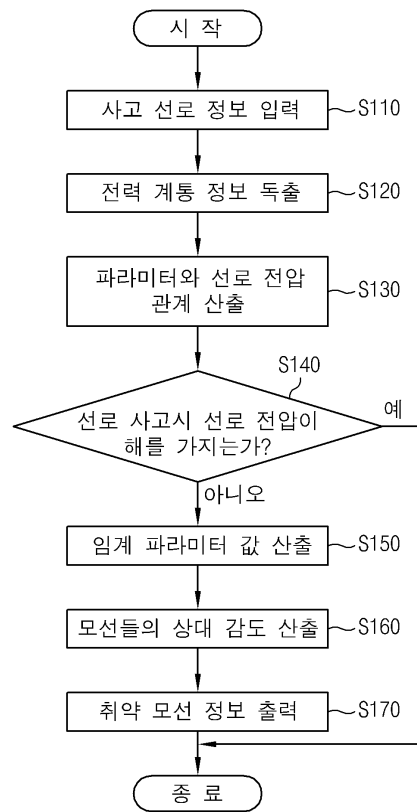
도 4는 파라미터와 선로 전압의 관계를 도시한 그래프.

도면

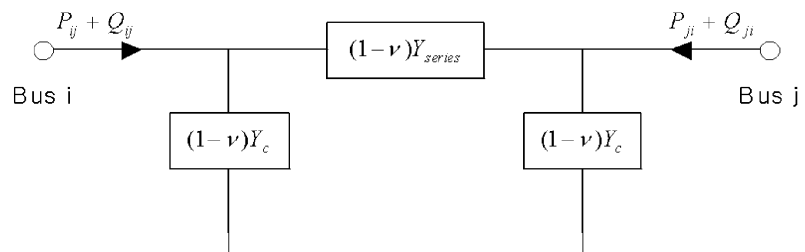
도면1



도면2



도면3



도면4

