(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。Int. Cl.
G01R 31/08 (2006.01)

(11) 공개번호 10-2007-0080913
(43) 공개일자 2007년08월14일

(21) 출원번호 10-2006-0012419
(22) 출원일자 2006년02월09일
심사청구일자 2006년02월09일

(71) 출원인 고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자 장길수
서울특별시 중랑구 묵1동 신내5단지 두산아파트 528-703
박창현
서울특별시 성북구 동선동3가 198번지 301호

(74) 대리인 김정식

전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템, 방법,및 상기 방법을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한프로그램을 기록한 매체

(57) 요약

순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템은 시스템 정보 독출부, 취약 지역 결정부, 결과 출력부를 포함한다. 시스템 정보 독출부는 전력 시스템의 정보를 독출한다. 취약 지역 결정부는 상기 시스템 정보, 및 상기 전력 시스템 내의 사고가 모의되는 사고 선로상의 지점과 상기 사고에 의해 전압 변화가 발생하는 목적 모선상의 전압 관계인 제 1 전압 강하식을 이용하여 사고 선로상의 양단 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압을 산출하고, 양단 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압이 모두 소정의 한계 전압보다 큰 경우가 아닌 경우 양단 지점 사이의 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압을 산출하고, 사고 선로상의 양단 지점, 및 양단 지점 사이의 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압들을 이용하여 제 1 전압 강하식을 단순화한 제 2 전압 강하식을 도출하고, 제 2 전압 강하식을 이용하여 사고 선로 상의 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압을 산출하며, 소정의 한계 전압 이하인 목적 모선상의 전압에 대응하는 사고 선로의 지점을 취약 지역으로 결정한다. 결과 출력부는 취약 지역 결정 결과를 출력한다.

대표도

도 4

특허청구의 범위

청구항 1.

전력 시스템의 정보를 독출하는 시스템 정보 독출부;

상기 시스템 정보, 및 상기 전력 시스템 내의 사고가 모의되는 사고 선로상의 지점과 상기 사고에 의해 전압 변화가 발생하는 목적 모선상의 전압 관계인 제 1 전압 강하식을 이용하여 상기 사고 선로상의 양단 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압을 산출하고,

상기 양단 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압이 모두 소정의 한계 전압보다 큰 경우가 아닌 경우 상기 양단 지점 사이의 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압을 산출하고,

상기 사고 선로상의 양단 지점, 및 양단 지점 사이의 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압들을 이용하여 상기 제 1 전압 강하식을 단순화한 제 2 전압 강하식을 도출하고,

상기 제 2 전압 강하식을 이용하여 상기 사고 선로 상의 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압을 산출하며,

상기 소정의 한계 전압 이하인 목적 모선상의 전압에 대응하는 사고 선로의 지점을 취약 지역으로 결정하는 취약 지역 결정부: 및

상기 취약 지역 결정 결과를 출력하는 결과 출력부를 포함하는 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템.

청구항 2.

제 1항에 있어서,

상기 양단 지점 사이의 지점은 상기 양단 지점의 중간 지점인 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템.

청구항 3.

제 1항에 있어서,

상기 제 2 전압 강하식은 상기 사고 선로상의 지점에 대한 상기 제 1 전압 강하식의 2차 보간식인 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템.

청구항 4.

제 3항에 있어서,

상기 목적 모선상의 전압이 상기 한계 전압과 동일한 경우의 상기 사고 선로상의 지점을 산출하기 위해 할선법을 이용하는 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템.

청구항 5.

순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템이 목적하는 전력 시스템의 정보를 독출하는 단계;

상기 시스템 정보, 및 상기 전력 시스템 내의 사고가 모의되는 사고 선로상의 지점과 상기 사고에 의해 전압 변화가 발생하는 목적 모선상의 전압 관계인 제 1 전압 강하식을 이용하여 상기 사고 선로상의 양단 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압을 산출하는 단계;

상기 양단 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압이 모두 소정의 한계 전압보다 큰 경우가 아닌 경우 상기 양단 지점 사이의 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압을 산출하는 단계;

상기 사고 선로상의 양단 지점, 및 양단 지점 사이의 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압들을 이용하여 상기 제 1 전압 강하식을 단순화한 제 2 전압 강하식을 도출하는 단계;

상기 제 2 전압 강하식을 이용하여 상기 사고 선로 상의 지점에 대응하는 상기 목적 모선상의 전압을 산출하는 단계;

상기 소정의 한계 전압 이하인 목적 모선상의 전압에 대응하는 사고 선로의 지점을 취약 지역으로 결정하는 단계; 및

상기 취약 지역 결정 결과를 출력하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법.

청구항 6.

제 5항에 있어서,

상기 양단 지점 사이의 지점은 상기 양단 지점의 중간 지점인 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법.

청구항 7.

제 5항에 있어서,

상기 제 2 전압 강하식은 상기 제 1 전압 강하식의 2차 보간식인 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법.

청구항 8.

제 7항에 있어서,

상기 목적 모선상의 전압이 상기 한계 전압과 동일한 경우의 상기 사고 선로상의 지점을 산출하기 위해 할선법을 이용하는 것을 특징으로 하는 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법.

청구항 9.

제 5 내지 8항 중 어느 한 항의 방법을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한 프로그램을 기록한 매체.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 전력 시스템에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 전력 품질을 개선하기 위한 시스템, 및 방법에 관한 것이다.

순간 전압 강하(voltage sag)는 가장 중요한 전력품질 문제 중 하나로 짧은 시간 동안의 전압강하 현상을 말한다. IEEE Std 1159-1995에 따르면 순간 전압 강하의 크기 범위는 0.1에서 0.9[p.u.]이고 지속시간은 0.5cycle에서 1분 범위로 정의된다. 일반적으로 순간 전압 강하는 전력 계통에서의 사고(fault)에 의해 많이 발생한다.

사고의 발생으로 계통의 전압은 떨어지게 되고 이로 인해 전압 변동에 민감한 부하들은 오동작을 하거나 동작을 멈추게 된다. 전압 변동에 민감한 부하의 사용은 계속 증가하고 있으며 순간 전압 강하 발생으로 인한 경제적 피해 또한 증가하고 있는 추세이다.

순간 전압 강하는 전압강하의 크기(magnitude)와 그 지속 시간(duration)이라는 중요한 두 가지 특성을 가진다. 순간 전압 강하의 전압 크기는 사고 위치와 전력 계통의 구성 형태에 영향을 받는다. 그 외에도 사고의 종류, 사고전 전압, 변압기 결선, 고장 임피던스 등의 영향도 받는다. 전압강하의 크기는 백분율이나 per-unit의 rms 전압으로 표시되며, 일반적으로 고장 계산에 의해서 구해진다.

순간 전압 강하의 지속 시간은 사고가 발생한 계통에서 고장 전류의 지속 시간과 같다고 볼 수 있다. 그러므로 실제적인 순간 전압 강하 지속시간은 브레이커나 릴레이, 퓨즈 등의 계통 보호 기기의 동작시간과 보호기기간 상호 작용을 고려한 약간의 시간 지연(time delay)의 합과 같다.

순간 전압 강하 평가를 위해서는 민감 부하에 대한 정확한 취약 지역(Area of Vulnerability)의 계산이 가장 중요하다. 취약 지역이라 함은 해당 부하 모선에 순간 전압 강하를 발생시키는 고장 위치를 말한다. 취약 지역을 계산하는 것은 이러한 고장 위치들을 모두 찾는 것이다. 정확한 취약 지역을 계산함으로써 특정 목적 모선에서의 연간 순간 전압 발생 횟수를 예측할 수 있다.

예를 들어 어떠한 민감 부하가 0.8[p.u.] 이하의 전압강하에 대해 오동작을 하거나 동작을 멈추게 된다면 그 부하의 한계 전압은 0.8[p.u.]이며 해당 부하에 대한 취약 지역은 부하가 연결되어 있는 모선의 전압을 0.8[p.u.] 이하로 만드는 계통 내 사고 위치들을 모두 찾는 것이다.

취약 취약지역 결정을 위한 종래의 방법들은 대표적으로 두 가지가 있다.

첫 번째는 critical distance법이 있다. 이 방법은 방사상(radial) 계통에서의 취약지역을 결정하는 방법으로 전압 분배 법칙에 의해 정확한 취약지역을 계산한다. 그러나 이 방법은 일반적인 망(mesh) 구조의 전력계통에는 적용되지 못하는 한계가 있다.

두 번째는 고장 위치(fault positions)법 이 있다. 이 방법은 모든 형태의 계통에 적용가능하나 그 정확도와 효율이 떨어지는 문제가 있다. 이 방법은 계통의 임의의 위치들에 사고를 모의하여 특정 부하 모선의 전압을 한계 값 이하로 만드는 위치를 찾는 방법으로 랜덤하게 위치를 선정하거나 선로의 길이에 비례하여 일정 구간별 위치를 선정하여 계산한다. 이 방법은 사고 모의 수와 모의 위치에 의해 그 정확도가 결정된다. 높은 정확도를 위해서는 많은 수의 사고 모의가 필요하여 비효율적인 방법이다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명은 모든 형태의 계통에 적용 가능하면서도 빠르고 정확하게 취약 지역 계산을 수행할 수 있는 시스템 및 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

발명의 구성

상기 문제점을 해결하기 위해 본 발명에 따른 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템은 시스템 정보 독출부, 취약 지역 결정부, 결과 출력부를 포함한다.

시스템 정보 독출부는 전력 시스템의 정보를 독출한다. 취약 지역 결정부는 상기 시스템 정보, 및 상기 전력 시스템 내의 사고가 모의되는 사고 선로상의 지점과 사고에 의해 전압 변화가 발생하는 목적 모선상의 전압 관계인 제 1 전압 강하식을 이용하여 사고 선로상의 양단 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압을 산출하고, 사고 선로상의 양단 지점, 및 양단 지점 사

이의 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압들을 이용하여 제 1 전압 강하식을 단순화한 제 2 전압 강하식을 도출하고, 제 2 전압 강하식을 이용하여 사고 선로 상의 지점에 대응하는 목적 모선상의 전압을 산출하며, 소정의 한계 전압 이하인 목적 모선상의 전압에 대응하는 사고 선로의 지점을 취약 지역으로 결정한다. 결과 출력부는 취약 지역 결정 결과를 출력한다.

민감 부하가 연결된 민감 부하 모선인 목적 모선상의 전압 분포와 한계 전압 사이의 관계를 이용하여 취약 지역을 결정함으로써 모든 형태의 계통에 적용 가능하면서도 빠르고 정확하게 취약 지역 계산을 수행할 수 있게 된다.

제 2 전압 강하식은 제 1 전압 강하식의 2차 보간식일 수 있고, 사고 선로상의 양단 지점 사이의 지점은 양단 지점의 중간 지점일 수 있다.

목적 모선상의 전압이 한계 전압과 동일한 경우의 사고 선로상의 지점을 산출하기 위해 할선법을 이용할 수 있다. 할선법을 이용함으로써, 취약 지역을 빠르고 더욱 정확하게 결정할 수 있게 된다.

아울러, 상기 시스템의 방법 형태의 발명과 상기 방법을 실행시키기 위한 컴퓨터 판독 가능한 프로그램을 기록한 매체가 함께 청구된다.

이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명한다.

도 1은 본 발명에 따른 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템의 개략적인 블록도이다. 도 1에서 취약 지역 결정 시스템(100)은 전력 시스템(200)과 사용자 단말(300)과 연결되어 있으며, 시스템 정보 독출부(110), 취약 지역 결정부(120), 및 결과 출력부(130)를 포함하고 있다.

시스템 정보 독출부(110)는 전력 시스템(200)의 정보를 독출하고, 취약 지역 결정부(120)는 시스템 정보를 이용하여 소정의 선로에 대한 취약 정보를 결정한다. 결과 출력부(130)는 취약 지역 결정부(120)가 수행한 취약 지역 결정 결과를 사용자 단말(300)로 출력한다.

취약 지역 결정부(120)가 취약 지역 결정하는 원리는 다음과 같다.

도 2는 사고 선로와 목적 모선을 포함하는 전력 시스템의 도면이다. 도 2와 같이 어떤 선로 F-T사이의 임의의 사고 위치 K가 있을 때 K에서의 사고에 의한 계통 내 임의의 모선 m의 전압 강하식을 유도할 수 있다.

불평형 사고에 의한 전압 강하 크기는 각 사고 형태 및 각 상에 따라 그 값을 달리하기 때문에 불평형 사고에 대한 취약지역 또한 각 사고 형태 및 각 상에 따라 따로따로 결정된다.

3상 평형 사고 및 불평형 사고 즉, 1선 지락 사고 (Single line-to-ground fault), 선간 단락 사고 (Line-to-line fault), 2선 지락 사고 (Double line-to-ground fault)에 대한 전압 강하식을 유도할 수 있다.

임의의 선로상의 사고로 인한 임의의 민감 부하 모선의 각 상 전압을 계산하기 위해서는 사고위치와 민감 부하 모선 사이의 sequence transfer impedance, 사고 위치에서의 sequence driving point impedance, 사고위치에서의 사고 전 전압을 알아야 한다.

사고위치 K와 모선m사이의 정상, 역상, 영상의 sequence transfer impedance는 다음과 같다. 위 첨자 0은 영상, 1은 정상, 2는 역상을 나타낸다.

$$Z_{mK}^{0} = Z_{mF}^{0} + (Z_{mT}^{0} - Z_{mF}^{0})p$$

$$Z_{mK}^{1} = Z_{mF}^{1} + (Z_{mT}^{1} - Z_{mF}^{1})p$$

$$Z_{mK}^{2} = Z_{mF}^{2} + (Z_{mT}^{2} - Z_{mF}^{2})p$$

Z_{mF}^{012}: 사고위치 K와 모선F사이의 각 sequence transfer impedance

Z_{mT}^{012}: 사고위치 K와 모선 T사이의 각 sequence transfer impedance

p: 사고 위치와 전체 선로 길이에 대한 비 (0<=p<=1)

사고위치 K에서의 정상, 역상, 영상의 sequence driving point impedance는 다음과 같다.

$$Z_{KK}^{0} = (Z_{FF}^{0} + Z_{TT}^{0} - 2Z_{FT}^{0} - Z_{C}^{0})p^2 + \{Z_{C}^{0} - 2(Z_{FF}^{0} - Z_{FT}^{0})\}p + Z_{FF}^{0}$$

$$Z_{KK}^{1} = (Z_{FF}^{1} + Z_{TT}^{1} - 2Z_{FT}^{1} - Z_{C}^{1})p^2 + \{Z_{C}^{1} - 2(Z_{FF}^{1} - Z_{FT}^{1})\}p + Z_{FF}^{1}$$

$$Z_{KK}^{2} = (Z_{FF}^{2} + Z_{TT}^{2} - 2Z_{FT}^{2} - Z_{C}^{2})p^2 + \{Z_{C}^{2} - 2(Z_{FF}^{2} - Z_{FT}^{2})\}p + Z_{FF}^{2}$$

Z_{FF}^{012}: 모선 F에서의 각 sequence driving point impedance

Z_{TT}^{012}: 모선 T에서의 각 sequence driving point impedance

Z_{C}^{012}: 선로의 각 sequence impedance

사고위치 K에서의 사고전 전압은 다음과 같다.

$$V_{K}^{pref} = V_{F}^{pref} + (V_{T}^{pref} - V_{F}^{pref})p$$

V_{F}^{pref}: 모선 F에서의 사고전 전압

V_{T}^{pref}: 모선 T에서의 사고전 전압

이상의 각 sequence impedance들과 사고전 전압식을 이용한 불평형 및 평형 고장에 대한 전압 강하식은 다음과 같다.

1) Single line-to-ground fault (SLGF)

임의의 선로 F-T 사이에서 A상에 SLGF가 발생했을 때 임의의 민감 부하 모선 m의 각 상전압은 다음과 같다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^{0} + Z_{mK}^{1} + Z_{mK}^{2}}{Z_{KK}^{0} + Z_{KK}^{1} + Z_{KK}^{2}} V_{K}^{pref} \quad \text{식(1)}$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^{0} + a^2 Z_{mK}^{1} + aZ_{mK}^{2}}{Z_{KK}^{0} + Z_{KK}^{1} + Z_{KK}^{2}} V_{K}^{pref} \quad \text{식(2)}$$

$$V_{C,m}^{fault} = aV_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^{0} + aZ_{mK}^{1} + a^2 Z_{mK}^{2}}{Z_{KK}^{0} + Z_{KK}^{1} + Z_{KK}^{2}} V_{K}^{pref} \quad \text{식(3)}$$

$V_{A,m}^{pref}$: 모선 m의 사고전 전압

a: complex number operator, e^{j120°

2) Line-to-line fault (LLF)

임의의 선로 F-T 사이에서 B와 C 상에서 LLF가 발생했을 때 임의의 목적 모선 m의 각 상전압은 다음과 같다. LLF에 의한 전압 강하 계산은 정상과 역상 성분만 필요하다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^1 - Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad \text{식(4)}$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{a^2 Z_{mK}^1 - a Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad \text{식(5)}$$

$$V_{C,m}^{fault} = a V_{A,m}^{pref} - \frac{a Z_{mK}^1 - a^2 Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad \text{식(6)}$$

3) Double line-to-ground fault (DLGF)

임의의 선로 F-T 사이에서 B와 C 상에서 DLGF가 발생했을 때 임의의 목적 모선 m의 각 상전압은 다음과 같다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{\left\{\left(Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0\right)Z_{KK}^2 + \left(Z_{mK}^1 - Z_{mK}^2\right)Z_{KK}^0\right\}}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{pref} \quad \text{식(7)}$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{\left\{\left(a^2 Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0\right)Z_{KK}^2 + \left(a^2 Z_{mK}^1 - a Z_{mK}^2\right)Z_{KK}^0\right\}}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{pref} \quad \text{식(8)}$$

$$V_{C,m}^{fault} = a V_{A,m}^{pref} - \frac{\left\{\left(a Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0\right)Z_{KK}^2 + \left(a Z_{mK}^1 - a^2 Z_{mK}^2\right)Z_{KK}^0\right\}}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{pref} \quad \text{식(9)}$$

4) Three phase fault (3PF)

임의의 선로 F-T 사이에서 3PF가 발생했을 때 임의의 목적 모선 m의 각 상전압은 다음과 같다. 3PF에 의한 전압 강하 계산은 정상 성분만 필요하다.

$$V_m^{fault} = V_m^{pref} - \frac{Z_{mK}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{pref} \quad \text{식(10)}$$

위의 전압 강하식들은 모두 p에 대한 식으로서, 유도된 식들을 이용해 특정 목적 모선 m의 전압의 크기를 얼마 이하로 만드는 임의의 선로 F-T에서의 사고위치(critical point) p를 계산할 수 있다.

이때의 p를 critical point라고 한다. 불평형 사고에 있어 사고가 발생한 상(faulted phase)의 전압은 급격히 떨어지게 되고 사고가 나지 않은 상(non-faulted phase)의 전압은 일반적으로 사고전보다 올라가거나 변화가 없다. 물론 변압기 결선이라던지 각 sequence impedance 간의 차이로 인해 non-faulted phase의 전압도 떨어질 수 있다.

그러나 순간 전압 강하 해석에서는 전압이 떨어지는 상만이 주 관심사이며 일반적으로 임의의 선로 *F*-*T*를 따라 발생하는 사고에 의한 특정 목적 모선 *m*에서의 전압 강하는 $0 \leqq p \leqq 1$에 대해 2차 곡선과 유사한 형태를 가진다.

이에 빠른 계산을 위해 한 선로당 critical point는 최대 2개까지 존재하며 선로 양단 모선에서의 사고로 인한 특정 목적 모선에서의 전압 강하는 선로상의 사고로 인한 전압 강하보다 크다라고 가정한다. 대부분의 경우 이 조건을 만족한다. 이러한 조건으로부터 다음을 유추할 수 있다.

1) 민감 부하의 전압 민감도(한계값)가 *p*=0과 *p*=1에서의 전압강하 크기보다 작다면 해당 선로는 취약지역에 포함되지 않는다.

2) 민감 부하의 전압 민감도(한계값)가 해당선로에 대한 전압 강하식의 최대값보다 큰 값이면 해당 선로 전체가 취약지역에 포함된다.

3) 민감 부하의 전압 민감도(한계값)가 *p*=0에서의 전압강하 크기와 *p*=1에서의 전압강하 크기 사이의 값이면 선로에는 하나의 critical point가 존재하며 해당선로의 일정한 부분만이 취약지역에 포함되게 된다.

4) 민감 부하의 전압 민감도(한계값)가 해당선로에 대한 전압 강하식의 최대값보다 작고 *p*=0과 *p*=1에서의 전압강하 크기보다 크면 선로에는 두 개의 critical point가 존재하며 해당선로의 두 부분이 취약지역에 포함되게 된다.

위 사실로부터 우리는 계통 내 모든 선로에 대해 전압 강하식과 위의 4가지 사실을 적용해 정확한 취약지역을 얻을 수 있다.

선로의 critical point를 찾는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 본 발명에서는 2차 보간법(quadratic interpolation)과 할선법(secant method)을 이용한다. 이 방법은 방사 및 망구조의 모든 계통에 다 적용가능하며 빠르고 정확하게 취약지역 계산을 할 수 있는 장점이 있다.

할선법은 비선형 방정식의 해를 찾는 수치해석방법 중 하나이며 뉴턴-랩슨 법에 비해 수렴 속도는 떨어지나 미분 계산이 필요 없어 전압 강하식과 같이 미분식을 유도하기 어려운 경우 이점이 많다.

비선형 방정식 *f(x)=0*의 해를 구하기 위한 일반적인 할선법은 다음과 같다.

1) 반복 루프 (*f(x)*: 비선형 방정식, x_{from}, x_{end}: 2개의 초기값, x_{new}: 새로운 추정값)

$$x_{new} = x_{end} - \frac{f(x_{end})(x_{end} - x_{from})}{f(x_{end}) - f(x_{from})}$$

$$x_{from} = x_{end}$$

$$x_{end} = x_{new}$$

2) 수렴 판단

$$|f(x_{new})| < tolerance$$

위의 일반적인 할선법을 전압 강하식에 적용하면 다음과 같다. 취약지역 계산에는 전압의 크기만을 고려하므로 *f(p)*의 크기 즉 $|f(p)| = 0$ 가 목적 함수가 된다.

반복 루프 (*f(p)*: 전압 강하식, p_{from}, p_{end}: 2개의 초기값, p_{new}: 새로운 추정값)

$$p_{new} = p_{end} - \frac{|f(p_{end})|(p_{end} - p_{from})}{|f(p_{end})| - |f(p_{from})|}$$

$p_{from} = p_{end}$

$p_{end} = p_{new}$

수렴 판단

$$|f(p_{new})| < tolerance$$

이것은 $|f(p)| = 0$ 형태의 전압 강하식의 해를 구하는 꼴로 일반적인 할선법이다. 이것은 전압 강하식의 크기를 0으로 만드는 p를 찾는 것이다.

그러나 특정 한계 전압값에 대한 전압 강하식을 $|f(p)| = 0$ 형태로 변환하지 않고 바로 해를 구하기 위해 다음과 같이 수정할 수 있다. 즉, $|f(p)| = V_{threshold}$ 형태의 전압 강하식에 바로 적용할 수 있게 간단히 수정할 수 있다. 이의 장점은 다양한 한계 전압값에 대해서 $|f(p)| = 0$ 형태로의 변환 없이 바로 적용할 수 있다는 것이다.

반복 루프 ($f(p)$: 전압 강하식, p_{from}, p_{end}: 2개의 초기값, p_{new}: 새로운 추정값)

$$p_{new} = p_{end} - \frac{(|f(p_{end})| - V_{threshold})(p_{end} - p_{from})}{|f(p_{end})| - |f(p_{from})|}$$

$p_{from} = p_{end}$

$p_{end} = p_{new}$

수렴 판단

$$\left||f(p_{new})| - V_{threshold}\right| < tolerance$$

이와 같은 할선법 사용의 장점은 다음과 같다. 해를 찾기 위해 전압 강하식의 미분 계산이 필요 없다. 또한, 전압 강하식을 $|f(p)| = 0$ 형태로 변환할 필요가 없기 때문에 다양한 전압 민감도 즉, 전압 한계값에 대해 식의 변형 과정 없이 바로 계산할 수 있는 이점이 있다.

할선법을 이용해 해를 찾기 위해서는 2개의 (초기값)starting value가 필요하다. 더욱 빠르게 해를 찾기 위해서는 해에 가까운 초기값의 선정이 필요하다. 이를 위해서는 제안하는 방법에서는 전압 강하식에 대한 2차 보간을 이용한다.

2차 보간법에는 대표적으로 Newton 보간법과 Lagrange 보간법이 있다. 두 방법 모두 나름의 장점이 있으나 2차와 같은 저차 보간에서는 그 성능의 차이가 없으며 어느 것을 사용해도 무방하다. 2차 보간의 경우 프로그램이 간단하여 계산부담이 없다. 2차 보간식을 $V_{threshold} = ap_i^2 + bp_i + c$ 라고 하면 근의 공식을 이용해 쉽게 해를 찾을 수 있다.

이상의 방법들은 3상 평형 사고 및 불평형 사고인 1선 지락, 2선 지락, 선간 단락 사고에도 적용 가능하다.

도 3은 본 발명에 따른 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법의 개략적인 흐름도이다.

먼저, 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템이 목적하는 전력 시스템의 정보를 독출한다(S110). 다음으로, 독출한 시스템 정보를 이용하여 전력 시스템 내의 목적하는 선로에 대한 취약 지역을 결정한다(S120). 마지막으로, 취약 지역 결정 결과를 소정의 출력 장치로 출력한다(S130).

도 4는 도 3의 취약 지역 결정 단계의 더욱 상세한 흐름도이다. 도 4에서 민감 부하 모선의 한계 전압에 대한 취약지역 계산 순서는 다음과 같다.

1) 계통의 사고전 전압을 알기 위해 조류계산을 수행한다.

2) 각 고장 형태에 따라 계산에 필요한positive, negative, zero sequence 어드미턴스 행렬을 구성하고, 각각에 대해 LU 분해(삼각 분해)를 수행한다.

3) 선로의 두 연결 모선에 대한 sequence 임피던스 행렬의 각 요소를 LU 행렬에 대한 forward 와 back substitution을 통해 계산한다.

4) 1)과 3)의 계산 결과를 이용해 전압 강하식을 형성한다.

5) 구성된 전압 강하식을 이용해 p=0과 p=1에서의 전압강하 크기를 계산한다. 주어진 한계 전압값이 p=0와 p=1에서의 전압강하 값보다 작으면 해당 선로는 취약지역에 포함되지 않으며 다음 선로에 대해 단계3)부터 다시 적용해 나간다. 주어진 한계 전압값이 p=0 또는 p=1에서의 전압강하 값보다 크면 다음 단계로 넘어간다.

6) 구성된 전압 강하식을 이용해 p=0.5에서의 전압강하 값을 계산한다.

7) 단계5)와 6)에서 계산한 p=0, 0.5, 1에서의 전압강하 값 세 개를 이용해 2차 보간을 실시한다. 주어진 한계 전압값이 p=0와 p=1에서의 전압강하 값의 사이 값이면 단계9)로 넘어간다. 주어진 한계 전압값이 p=0와 p=1에서의 전압강하 값보다 크면 다음 단계로 넘어간다.

8) 보간 2차식에서 최대일 때의 p값 $p_{i,\max}$를 계산한다. $p_{i,\max}$는 0과 1 사이의 값이어야 한다. 이 $p_{i,\max}$를 구성된 전압 강하식에 대입하여 계산한다. 이때의 값을 전압 강하식의 최대값으로 가정한다. 주어진 한계 전압값이 이 최대값보다 크거나 2차 보간 방정식의 판별식이 0보다 작거나 같으면 해당선로 전체를 취약지역에 포함시키고 다음 선로에 대해 단계3)부터 다시 적용해 나간다. 주어진 한계 전압값이 이 최대값보다 작고 p=0와 p=1에서의 전압강하 값보다 크면 해당선로에는 2개의 critical point 가 존재하게 된다.

9) 근의 공식을 이용해 2차 보간식의 해를 계산한다. 보간식의 해가 p_{ic}라면 두 초기값은 p_{ic}와 $p_{ic}+\Delta p$ 또는 $p_{ic}-\Delta p$와 p_{ic}로 결정한다.

10) 단계9)에서 결정된 초기값과 할선법을 이용해 critical point를 계산한다.

11) 다음 선로에 대해 단계3)부터 다시 적용해 나간다. 모든 선로에 대해 다 적용될 때까지 행한다.

12) 계산된 critical point들을 이용해 취약지역을 결정한다.

도 5는 본 발명에 따른 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법을 적용하기 위한 간단한 7 모선 계통의 도면이고, 도 6은 도 5의 전력 시스템의 조류 계산 결과의 표이다.

본 실시예에서는 두 선로에 대해서 본 발명을 적용해 3상 평형 사고에 대한 취약 지역을 결정해 본다. 먼저, 모선 1과 2 사이의 선로에서의 취약 지역을 결정한다.

민감 부하 모선은 모선 5로 가정하며 한계 전압값은 0.25[p.u.]로 가정한다. 해당선로의 정상 임피던스는 $Z_C^1 = 0.02 + j0.06$이다.

3상 평형 사고에 대해서는 정상 성분만 고려하면 된다. 모선 1과 2에 대한 driving-point impedance와 transfer impedance를 LU 분해를 통해 계산한다. 결과는 다음과 같다.

$$Z_{11}^1 = 0.0887 + j0.1237 = Z_{FF}^1,\ Z_{22}^1 = 0.0846 + j0.0880 = Z_{TT}^1$$

$$Z_{12}^1 = Z_{21}^1 = 0.0787 + j0.0815 = Z_{FT}^1,\ Z_{15}^1 = 0.0766 + j0.0585 = Z_{mF}^1 = Z_{Fm}^1$$

$$Z_{25}^1 = 0.0814 + j0.0613 = Z_{mT}^1 = Z_{Tm}^1,\ V_m^{pref} = V_5^{pref} = 1.00665\angle -0.8273°$$

위의 결과들을 이용해 식(10)을 구성한다.

$$0.25 = \left| V_5^{pref} - \frac{Z_{5K}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{pref} \right|$$

$$Z_{KK}^1 = (-0.0042 - j0.0113)p^2 + (-j0.0244)p + (0.0887 + j0.1237)$$

$$Z_{5K}^1 = (0.0048 + j0.0028)p + (0.0767 + j0.0585)$$

$$V_K^{pref} = (-0.0069 - j0.0349)p + (1.0441 + j0.1114)$$

위의 식을 이용해 p=0과 p=1일 때의 전압강하 크기를 계산하면 각각 0.3704와 0.1533[p.u.]이다. 주어진 한계전압이 0.25이고 이 두 값의 사이 값이므로 해당선로에는 하나의 critical point가 존재한다. p=0.5에서의 전압강하 크기를 계산하면 0.2903이다. 위의 세 값을 이용해 2차 보간을 실시한다. 보간 방정식은 다음과 같다.

$$0.25 = -0.1137\, p_i^2 - 0.1034\, p_i + 0.3704$$

근의 공식을 이용해 $0 \leqq p_{ic} \leqq 1$를 만족하는 해 p_{ic}를 구하면 0.6703 하나뿐이다.

도 7은 모선 1과 2 사이 선로에서의 3상 평형 사고에 의한 모선 5에서의 전압강하 크기와 2차 보간식의 그래프를 나타낸다.

더욱 정확한 해를 찾기 위해 할선법을 적용한다. 두 초기값은 p_{ic}와 $p_{ic} + 0.001$로 한다.

할선법에 의해 계산된 정확한 critical point p_c는 0.6771이다. 그러므로 해당선로에서의 취약지역은 $0.6771 \leqq p \leqq 1$의 범위이다. 즉, 전체 선로 길이의 약 67%에서 끝까지가 취약지역에 포함된다. 본 계산에서 사용된 수렴 오차는 0.0001이었으며 한 번의 반복으로 해에 수렴해 아주 빠르게 계산됨을 확인하였다.

다음으로, 모선 1과 3 사이의 선로에서의 취약지역을 결정한다.

민감 부하 모선은 모선 7로 가정하며 한계 전압값은 0.5[p.u.]로 가정한다. 해당선로의 정상 임피던스는 $Z_C^1 = 0.08 + j0.24$이다. 모선 1과 3에 대한 driving-point impedance와 transfer impedance를 LU 분해를 통해 계산한다. 결과는 다음과 같다.

$$Z_{11}^1 = 0.0887 + j0.1237 = Z_{FF}^1,\ Z_{33}^1 = 0.0959 + j0.1070 = Z_{TT}^1$$

$$Z_{13}^1 = Z_{31}^1 = 0.0778 + j0.0737 = Z_{FT}^1, \quad Z_{17}^1 = 0.0752 + j0.0522 = Z_{mK}^1 = Z_{Fm}^1$$

$$Z_{37}^1 = 0.0766 + j0.0465 = Z_{mT}^1 = Z_{Tm}^1, \quad V_m^{pref} = V_7^{pref} = 1.04\angle 0^\circ$$

위의 결과들을 이용해 식(10)을 구성한다.

$$0.5 = \left| V_7^{pref} - \frac{Z_{7K}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{pref} \right|$$

$$Z_{KK}^1 = (-0.0511 - j0.1568)p^2 + (0.0583 + j0.1401)p + (0.0887 + j0.1237)$$

$$Z_{7K}^1 = (0.0014 - j0.0057)p + (0.0752 + j0.0522)$$

$$V_K^{pref} = (-0.0515 - j0.0943)p + (1.0441 + j0.1114)$$

위의 식을 이용해 p=0과 p=1일 때의 전압강하 크기를 계산하면 각각 0.4507과 0.4758[p.u.]이다. p=0.5에서의 전압강하 크기를 계산하면 0.5956이다. 위의 세 값을 이용해 2차 보간을 실시한다. 보간 방정식은 다음과 같다.

$$0.5 = -0.5290 p_i^2 + 0.5542 p_i + 0.4507$$

주어진 한계 전압이 0.5이므로 p=0 와 1에서의 전압강하 크기보다 크다. 보간식의 최대값일 때의 $p_{i,\max}$는 0.5238이고 이때의 전압강하 크기는 0.5960 [p.u.] 이다. 그러므로 해당 선로는 두 개의 critical point를 가지며 선로의 두 부분이 취약지역에 포함되게 된다.

근의 공식을 이용해 $0 \leq p_{ic} \leq 1$을 만족하는 두 개의 해 p_{ic1}과 p_{ic2}를 구하면 각각 0.0981과 0.9496이다.

도 8은 모선 1과 3 사이 선로에서의 3상 평형 사고에 의한 모선 7에서의 전압강하 크기와 2차 보간식의 그래프를 나타낸다.

더욱 정확한 해를 찾기 위해 할선법을 적용한다. 두 개의 p_{ic1}, p_{ic2}에 대한 각각의 초기값은 p_{ic1}과 $p_{ic1} + 0.001$, $p_{ic2} - 0.001$과 p_{ic2}로 한다.

할선법에 의해 계산된 정확한 critical point p_{c1}은 0.0841, p_{c2}는 0.9607이다. 그러므로 해당선로에서의 취약지역은 $0 \leq p \leq 0.0841$과 $0.9607 \leq p \leq 1$의 두 부분이다. 본 계산에서 사용된 수렴 오차는 0.0001이었으며 각 두 번의 반복으로 해에 수렴해 아주 빠르게 계산됨을 확인하였다.

마지막으로, IEEE-30 모선 계통에 대해 본 발명을 적용해 본다.

IEEE-30 모선 계통은 30개의 모선과 37개의 선로, 4개의 변압기로 연결되어있다. 수렴 오차는 0.0001로 하여 계산하였다. 목적 모선은 15번 모선으로 가정하였으며 한계 전압은 0.7[p.u.]로 가정하였다. 모든 발전기의 정상, 역상, 영상 impedance는 각 j0.3, j0.2, j0.05로 가정하였고 모든 변압기 결선은 grounded wye-grounded wye로 가정하였다. 사고는 B와 C 상에서의 LLF를 가정하였고 각 B 상과 C상에 대한 취약지역을 계산하였다. B상에 대한 취약지역은 전압 강하식 (5)를 C상에 대한 취약지역은 전압 강하식 (6)을 구성하여 계산된다.

도 9는 IEEE-30 모선 계통의 15번 모선에 대한 취약 지역 계산 결과의 표이다. 도 9의 표에는 B와 C 상에 대한 각 취약지역과 할선법 반복횟수를 같이 나타내었다.

도 10은 도 9의 계산 결과를 전력 시스템에 도시한 도면이다. 도 10의 실선과 점선 영역에서의 LLF는 15번 모선 부하에 순간 전압 강하를 발생시킨다는 것을 보여 준다.

이상에서, 취약지역을 빠르고 정확하게 계산할 수 있는 방법이 설명되었다. 본 발명은 3상 평형 사고뿐 아니라 1선 지락, 2선 지락, 선간 단락과 같은 불평형 사고에 대해서도 모두 적용 가능하다.

발명의 효과

본 발명에 의해 모든 형태의 계통에 적용 가능하면서도 빠르고 정확하게 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 계산을 수행할 수 있게 된다.

본 발명은 2차 보간 다항식과 전압 강하식만을 이용하여 다양한 한계 전압값에 대한 취약지역을 빠르게 계산할 수 있는 장점이 있다.

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

도면의 간단한 설명

도 1은 본 발명에 따른 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 시스템의 개략적인 블록도.

도 2는 사고 선로와 목적 모선을 포함하는 전력 시스템의 도면.

도 3은 본 발명에 따른 순간 전압 강하 평가를 위한 취약 지역 결정 방법의 개략적인 흐름도.

도 4는 도 3의 취약 지역 결정 단계의 더욱 상세한 흐름도.

도 5는 간단한 전력 시스템의 도면.

도 6은 도 5의 전력 시스템의 조류 계산 결과의 표

도 7은 모선 1과 2 사이 선로에서의 사고에 의한 모선 5에서의 전압 강하와 보간 곡선.

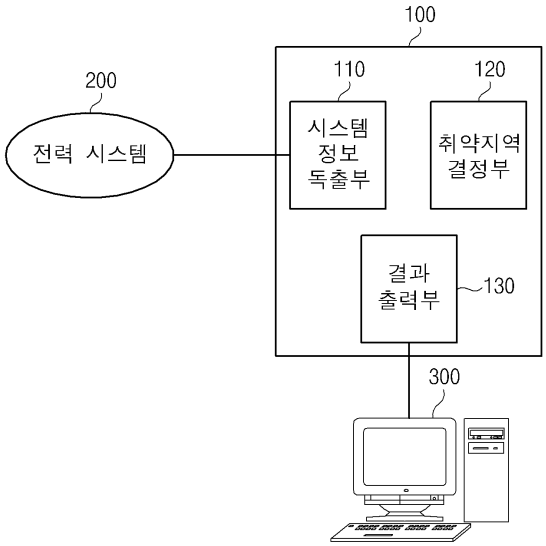
도 8은 모선 1과 3 사이 선로에서의 사고에 의한 모선 7에서의 전압 강하와 보간 곡선.

도 9는 IEEE-30 모선 15번 모선에 대한 취약 지역 계산 결과의 표

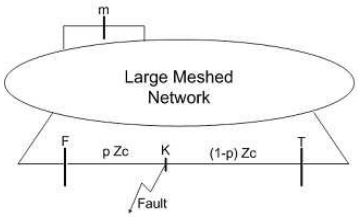
도 10은 도 9의 계산 결과를 전력 시스템에 도시한 도면.

도면

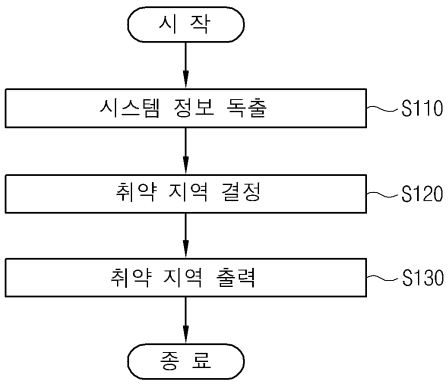
도면1


100
110
120
200
전력 시스템
시스템 정보 독출부
취약지역 결정부
결과 출력부
130
300

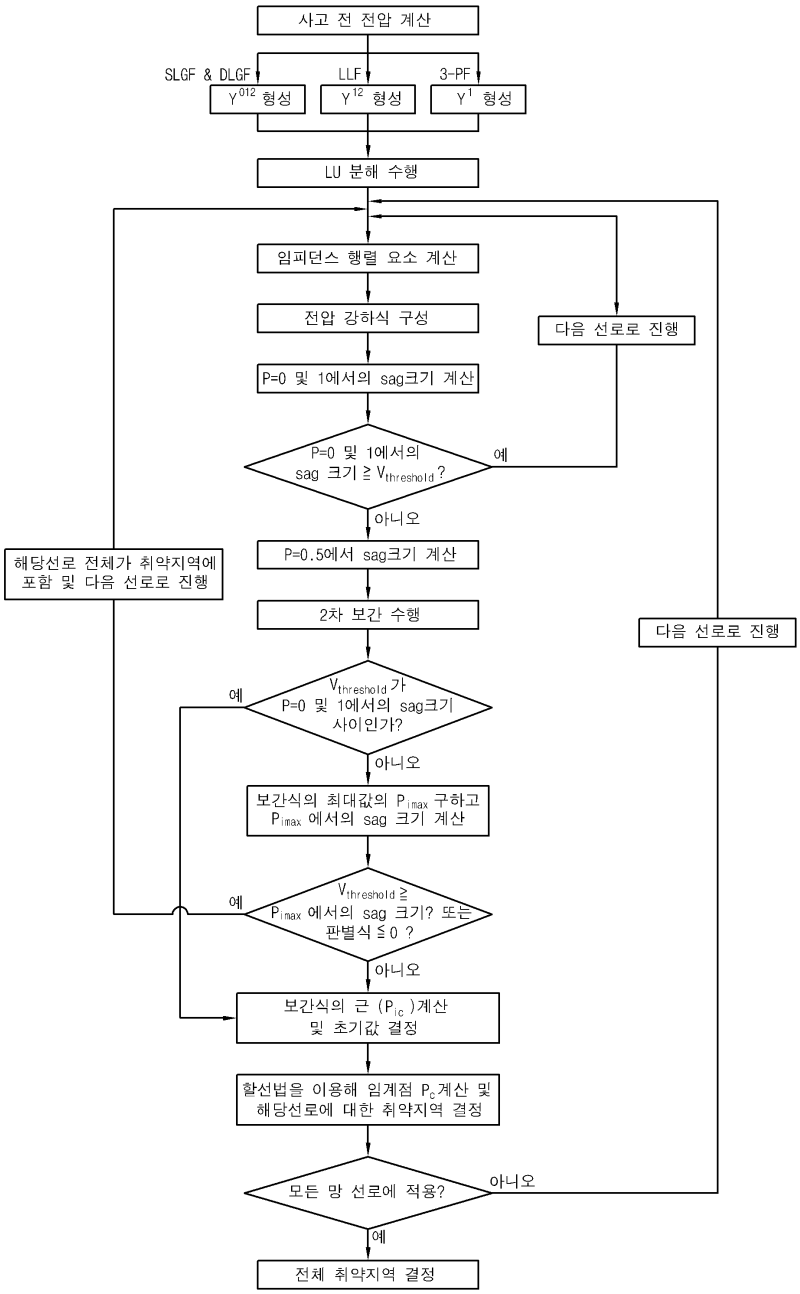
도면2


m
Large Meshed Network
F
p Zc
K
(1-p) Zc
T
Fault

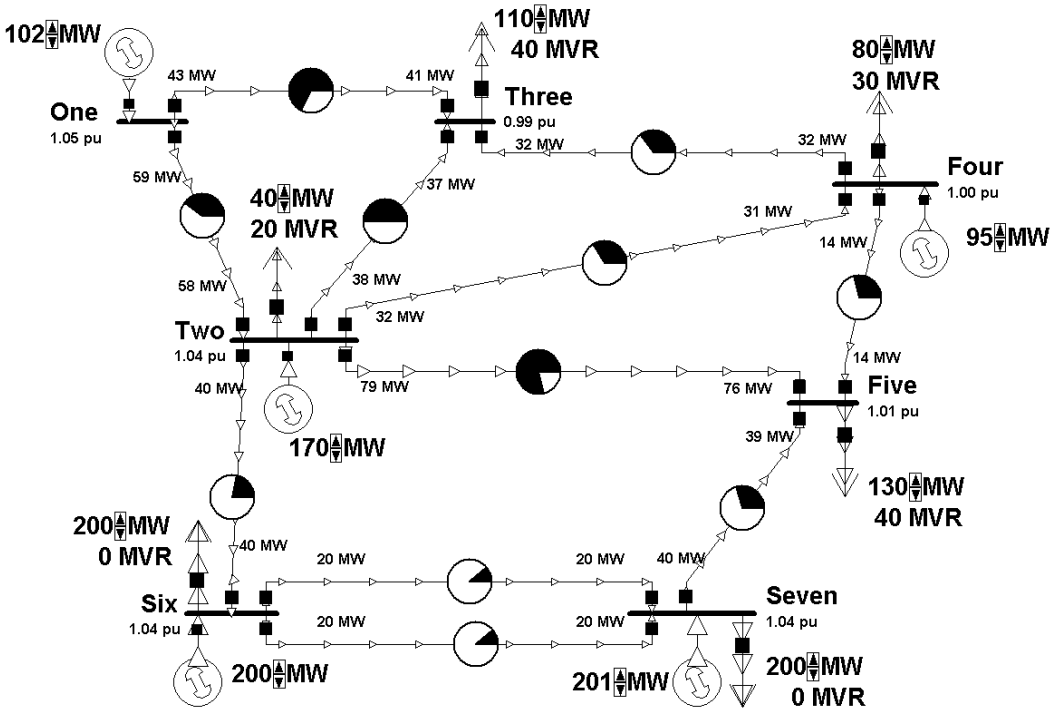
도면3


시 작
시스템 정보 독출
S110
취약 지역 결정
S120
취약 지역 출력
S130
종 료

도면4


사고 전 전압 계산
SLGF & DLGF
LLF
3-PF
Y^{012} 형성
Y^{12} 형성
Y^{1} 형성
LU 분해 수행
임피던스 행렬 요소 계산
전압 강하식 구성
다음 선로로 진행
P=0 및 1에서의 sag크기 계산
P=0 및 1에서의 sag 크기 ≥ $V_{threshold}$?
예
아니오
해당선로 전체가 취약지역에 포함 및 다음 선로로 진행
P=0.5에서 sag크기 계산
2차 보간 수행
다음 선로로 진행
$V_{threshold}$ 가 P=0 및 1에서의 sag크기 사이인가?
예
아니오
보간식의 최대값의 P_{1max} 구하고 P_{1max} 에서의 sag 크기 계산
$V_{threshold}$ ≥ P_{1max} 에서의 sag 크기? 또는 판별식 ≤ 0 ?
예
아니오
보간식의 근 (P_{1c})계산 및 초기값 결정
할선법을 이용해 임계점 P_c 계산 및 해당선로에 대한 취약지역 결정
모든 망 선로에 적용?
아니오
예
전체 취약지역 결정

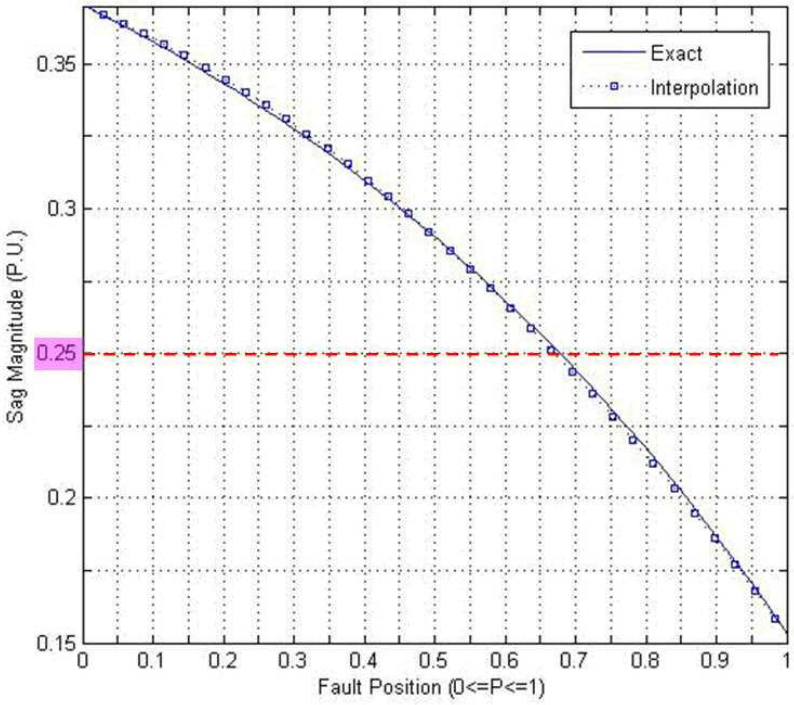
도면5



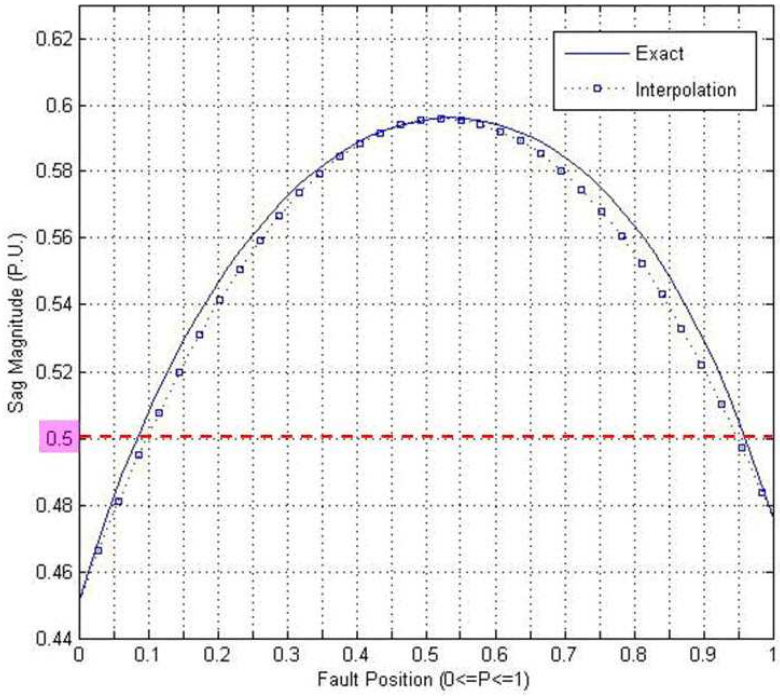
도면6

	Name	PU volt	Angle (deg)	Load MW	Load MVAr	Gen MW	Gen MVAr
1	one	1.05000	6.0902			101.85	5.2517
2	two	1.04000	4.2182	40.00	20.0000	170.08	33.2397
3	three	0.99269	0.9877	110.00	40.0000		
4	four	1.00000	1.4643	80.00	30.0000	95.03	19.9892
5	five	1.00665	0.8273	130.00	40.0000		
6	six	1.04000	2.8086	200.00	0.0000	200.33	6.5929
7	seven	1.04000	0.0000	200.00	0.0000	200.65	51.2902

도면7


Exact
Interpolation
Sag Magnitude (P.U.)
Fault Position (0<=P<=1)
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1

도면8


Exact
Interpolation
Sag Magnitude (P.U.)
Fault Position (0<=P<=1)
0.62
0.6
0.58
0.56
0.54
0.52
0.5
0.48
0.46
0.44
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1

도면9

Line	LLF			
	Phase B	Iterations	Phase C	Iterations
1-2	no area		0.4064≤P≤1	1
1-3	no area		0.8818≤P≤1	1
2-4	0.8442≤P≤1	2	0≤P≤0.1591 0.6246≤P≤1	2 1
3-4	0.3686≤P≤1	1	entire	
2-5	no area		0≤P≤0.0759	3
2-6	0.8304≤P≤1	2	0≤P≤0.1485 0.6489≤P≤1	2 1
4-6	entire		entire	
5-7	no area		no area	
6-7	0≤P≤0.3549	1	0≤P≤0.5429	1
6-8	entire		entire	
9-11	0≤P≤0.1061	1	0≤P≤0.0582	1
9-10	entire		entire	
12-13	entire		entire	
12-14	0≤P≤0.6194	2	entire	
12-15	entire		entire	
12-16	0≤P≤0.6345	1	entire	
14-15	0.3911≤P≤1	1	entire	
16-17	no area		entire	
15-18	entire		entire	
18-19	0≤P≤0.2366	1	entire	
19-20	no area		entire	
10-20	0≤P≤0.2646	2	entire	
10-17	0≤P≤0.6225	1	entire	
10-21	0≤P≤0.5649	1	entire	
10-22	0≤P≤0.2281	2	entire	
21-22	no area		entire	
15-23	entire		entire	
22-24	no area		entire	
23-24	0≤P≤0.1306	1	entire	
24-25	no area		0≤P≤0.0383	1
25-26	no area		no area	
25-27	no area		no area	
27-29	no area		no area	
27-30	no area		no area	
29-30	no area		no area	
8-28	0≤P≤0.006	1	0≤P≤0.0615	3
6-28	0≤P≤0.5564	1	0≤P≤0.9152	2

도면10

