

행렬의 역정리를 이용한 전력공급 선로의 상간단락 사고지점 검출 방법

A Novel Fault Location Method for a Line to Line Fault Using Inverse Theorem of Matrix on Electric Power Lines

이덕수* 최면송** 현승호***
Lee, Duck-su Choi, Myeon-song Hyun, Seung-ho

ABSTRACT

Unbalanced systems, such as distribution systems, have difficulties in fault locations due to single-phase laterals and loads. In this paper, a novel fault location algorithm is suggested for a line to line faults using inverse theorem of matrix on electric power lines. The fault location for balanced systems has been studied using the current distribution factor, by a conventional symmetrical transformation, but that for unbalanced systems has not been investigated due to their high complexity. The proposed algorithms overcome the limit of the conventional algorithm using the conventional symmetrical transformation, which requires the balanced system and are applicable to any electric power system but are particularly useful for unbalanced distribution systems. The simulation results oriented by the real distribution system are presented to show its effectiveness and accuracy.

1. 서 론

전력 계통에서 전력공급 선로는 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하며 대기중에 노출되어 있음으로 해서 뇌우, 동물의 접촉, 보호기기의 오·부 동작, 그리고 기타 다양한 사고 등의 원인으로 사고가 빈번하게 발생한다. 선로에서 사고가 발생할 경우 사고 발생지점을 빠르고 정확하게 찾아내고 신속한 고장복구를 하는 것이 정전 비용을 최소화하며 더 나아가 서비스 신뢰도와 전력의 질을 높이는 측면에서 매우 중요하다. 따라서 송배전 선로상에서 고장발생시 고장점까지의 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘은 최근 10여년 동안 활발히 연구되어 왔다[1-3].

송전계통은 일반적으로 3상 평형회로이므로 기본적으로 대칭좌표법[4]을 이용하는 것이 보통이다. 송전계통에 대한 고장점 검출 방법으로는 진행파를 이용하는 방법, 전압과 전류의 고조파 성분을 이용하는 방법, 그리고 전압과 전류의 기본파 성분을 사용한 결보기 임피던스 법 등으로 구분할 수 있다. 또한 배전계통에 관한 연구로는 1선 지락의 경우 전압, 전류의 고조파 성분을 이용하는 방법과 기본파 성분, 선로 파라미터를 이용하는 방법으로 나눌 수 있으며, 배전계통의 다양한 특이성을 고려하기 위해 전압, 전류를 재계산하는 방법이 소개되었다[5].

배전계통은 송전계통과 비교하여 배전 선로의 비 동질성, 부하 전류, 다중의 부하 탭 등의 이유로 불평형 계통이다. 이 불평형 요인 때문에 고장해석의 가장 기본이 되는 대칭좌표법을 배전계통에서는 사용할 수 없어, 매우 복잡하고 어려운 문제로 인식되어 왔다[6]. 일반적으로 선로사고는 1선 지락과 선간단락 두 가지로 나누어지며 그 외의 모든 사고는 이 두 가지로 표현된다. 그러나 배전계통의 고장검출에 대한 연구가 거의 모두 1선 지락에 관한 것으로 한정되어온 가장 큰 이유는

* 명지대학교 ERC센터 연구원, 비회원
** 명지대학교 전기공학과 교수, 비회원
*** 명지대학교 전기공학과 교수, 정회원

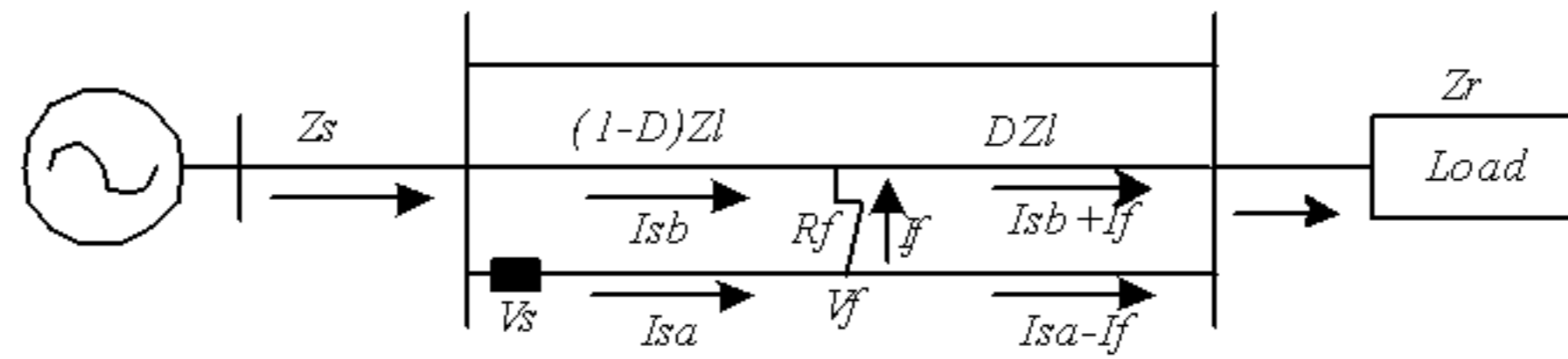
불평형 계통의 해석에서 대칭좌표법을 사용하지 못하므로 해석이 용이하지 않다는 것이다.

본 논문에서는 고장 저항을 포함하는 송배전 계통 선간단락 사고시 행렬의 역정리를 이용하여 고장점을 검출하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 보호계전기가 설치된 위치에서 측정된 기본파 전압, 전류만을 사용하였으며 고장점 저항의 영향을 배제한 알고리즘이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 실제계를 기반으로 대상 계통을 모델링 하였으며, 모의 계통의 선간단락시 고장거리 계산을 위한 EMTP(Electro Magnetic Transient Program)을 이용한 사례연구 결과를 논문에 제시하였다.

2. 전력공급 선로의 상간단락 사고지점 검출 방법

2.1 기본개념

그림 1은 3상 평형 송배전계통의 a상 b상 선간단락 고장시 단선도를 나타낸다.



< 그림 1. 3상 평형 모의계통도 >

그림 1과 같은 계통에서 보호계전기 설치점에서 측정된 전압과 전류를 사용할 때 고장상의 상전압차는 식 (1)과 같다.

$$Vs_a - Vs_b = (1-D)((Zl_{aa} - Zl_{ba})Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab})Is_b) + I_f R_f \quad (1)$$

여기서,

$Vs_{abc} = [Vs_a, Vs_b, Vs_c]'$: 계전기 설치점 상전압벡터

$Is_{abc} = [Is_a, Is_b, Is_c]'$: 계전기 설치점 상전류벡터

$V_{fabc} = [V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}]'$: 고장지점 상전압벡터

$I_{fabc} = [I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}]'$: 고장지점 고장전류벡터

$Zl = \begin{bmatrix} Zl_{aa} & Zl_{ab} & Zl_{ac} \\ Zl_{ba} & Zl_{bb} & Zl_{bc} \\ Zl_{ca} & Zl_{cb} & Zl_{cc} \end{bmatrix}$: 선로 임피던스행렬

$1-D$: 고장거리, I_f : 고장 전류, R_f : 고장 저항

식 (1)에서 고장 저항을 제외한 모든 임피던스는 알고 있는 값이며, 계전기 설치점으로부터 상전압·전류, 대칭분 전류를 취득할 수 있다. 그러나 고장 전류 I_f 는 얻을 수 없으므로 선간단락 고장 시 $I_{fa} = -I_{fb}$, $I_{fc} = 0$ 이라는 사실을 이용한 대칭좌표변환의 해석결과에서 $I_0 = 0$, $I_2 = -aI_1$ 를 얻고 이로부터 고장전류는 다음과 같이 계산한다.

$$I_f = I_{fa} = I_0 + I_1 + I_2 = (1-a)I_2 = (1-a)D_2 Is_2 \quad (2)$$

여기서, $a = e^{\frac{2\pi i}{3}}$ 이고 $D_2 = \frac{I_2}{Is_2}$ 로서 역상전류 분배계수이다. 역상전류 I_2 는 역상회로의 구성에 의한 계전기 설치점의 역상전류 Is_2 와 이 전류분배계수를 이용하여 구한다.

2.2 행렬의 역정리를 이용한 고장점 검출 알고리즘

그림 1의 계통을 불평형을 포함하는 일반적인 계통으로 가정할 때 계전기 설치점 A 상의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$Vs_a - Vs_b = (1-d)((Zl_{aa} - Zl_{ba}) \cdot Is_a - (Zl_{bb} - Zl_{ab}) \cdot Is_b - (Zl_{bc} - Zl_{ac}) \cdot Is_c) + I_f R_f \quad (3)$$

그림 1의 고장지점에서는 고장회로와 부하회로의 두 병렬회로가 존재한다. 고장회로의 고장 어드미턴스는 3상 행렬로 다음과 같다.

$$Yf = \begin{bmatrix} 1/R_f & -1/R_f & 0 \\ -1/R_f & 1/R_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고 부하회로는 선로 임피던스와 부하 임피던스의 직렬연결이므로 그 어드미턴스는 $(dZl_{abc} + Zr_{abc})^{-1}$ 이다.

$$\text{여기서, } Zr_{abc} = \begin{bmatrix} Zr_{aa} & Zr_{ab} & Zr_{ac} \\ Zr_{ba} & Zr_{bb} & Zr_{bc} \\ Zr_{ca} & Zr_{cb} & Zr_{cc} \end{bmatrix} : \text{부하 임피던스 행렬}$$

어드미턴스의 역행렬 $(Yf + (dZl_{abc} + Zr_{abc})^{-1})^{-1}$ 은 행렬의 역의 정리(Inverse lemma)[9]를 이용하면 간단하게 계산할 수 있다. 행렬의 역의 정리는 다음과 같다.

$$(A^{-1} + BCD)^{-1} = A - AB(C^{-1} + DAB)^{-1}DA \quad (5)$$

역의 정리를 이용하기 위하여 $(Yf + (dZl_{abc} + Zr_{abc})^{-1})^{-1}$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a4 & a5 & a6 \\ a7 & a8 & a9 \end{bmatrix}^{-1} = (dZl_{abc} + Zr_{abc})^{-1} = \begin{bmatrix} dZl_{aa} + Zr_{aa} & dZl_{ab} + Zr_{ab} & dZl_{ac} + Zr_{ac} \\ dZl_{ba} + Zr_{ba} & dZl_{bb} + Zr_{bb} & dZl_{bc} + Zr_{bc} \\ dZl_{ca} + Zr_{ca} & dZl_{cb} + Zr_{cb} & dZl_{cc} + Zr_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

그리고 $B = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $D = (1 \quad -1 \quad 0)$, $C = 1/R_f$ 라 정의하면 (10)과 같이 Yf 를 얻을 수 있다. 그러면 역의 정리에 의하여 다음과 같이 된다.

$$[Yf + (dZl_{abc} + Zr_{abc})^{-1}]^{-1} = A - \begin{pmatrix} a1 - a2 \\ a4 - a5 \\ a7 - a8 \end{pmatrix} (R_f + (a1 - a2 - a4 + a5))^{-1} \begin{pmatrix} a1 - a4 \\ a2 - a5 \\ a3 - a6 \end{pmatrix} \quad (7)$$

이를 이용하여 고장전류 벡터를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} I_f \\ -I_f \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{R_f + C_1 - C_2} \begin{pmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ xx & xx & xx \\ xx & xx & xx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Is_a \\ Is_b \\ Is_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서,

$$C_1 = a1 - a4 = d(Zl_{aa} - Zl_{ba}) + Zr_{aa} - Zr_{ba} = dA_1 + B_1$$

$$C_2 = a2 - a5 = d(Zl_{ab} - Zl_{bb}) + Zr_{ab} - Zr_{bb} = dA_2 + B_2$$

$$C_3 = a3 - a6 = d(Zl_{ac} - Zl_{bc}) + Zr_{ac} - Zr_{bc} = dA_3 + B_3$$

여기서 xx 는 구할 필요가 없는 항이다. 식(8)의 고장전류를 정리하면 다음과 같다.

$$I_f = \frac{C_1 I_{S_a} + C_2 I_{S_b} + C_3 I_{S_c}}{R_f + C_1 - C_2} \quad (9)$$

그리고 이 식을 고장거리에 관한 식 (3)에 대입하여 고장전류를 소거하면 다음과 같다.

$$V_{S_a} - V_{S_b} = (1-d) \{A_1 I_{S_a} + A_2 I_{S_b} + A_3 I_{S_c}\} + \frac{C_1 I_{S_a} + C_2 I_{S_b} + C_3 I_{S_c}}{R_f + C_1 - C_2} R_f \quad (10)$$

이를 고장 거리에 관한 이차방정식으로 표시하기 위하여 이차 방정식 계수를 상수로 정의하고 각 계수를 실수부분과 허수부분으로 나타내면 다음과 같다.

$$d^2(a_r + ja_i) + d(b_r + jb_i) + c_r + jc_i + R_f(d_r + jd_i) = 0 \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_r + ja_i &= (A_1 - A_2)D_1 \\ b_r + jb_i &= (A_1 - A_2)(V_{S_a} - V_{S_b} - D_1) + (B_1 - B_2)D_1 \\ c_r + jc_i &= (B_1 - B_2)(V_{S_a} - V_{S_b} - D_1) \\ d_r + jd_i &= (V_{S_a} - V_{S_b} - D_1 - D_2) \\ D_1 &= A_1 I_{S_a} + A_2 I_{S_b} + A_3 I_{S_c} \\ D_2 &= B_1 I_{S_a} + B_2 I_{S_b} + B_3 I_{S_c} \end{aligned}$$

그리고 식(11)을 실수부와 허수부로 분리하여 R_f 를 소거한 후 d 에 관한 2차방정식으로 정리하면 다음과 같이 구해진다.

$$d^2(a_r - \frac{d_r}{d_i} a_i) + d(b_r - \frac{d_r}{d_i} b_i) + c_r - \frac{d_r}{d_i} c_i = 0 \quad (13)$$

고장거리 $(1-d)$ 는 식(13)의 2차 방정식의 해를 이용하여 구한다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 행렬의 역정리에 의한 배전계통 선간단락 사고 고장거리 계산 알고리즘의 실적용 타당성을 검증하기 위하여 사례연구를 그림 1.에 나타낸 것과 같은 실제와 유사한 22.9[kV] 배전선로를 대상으로 하였다. 고장 모의는 EMTP(Electromagnetic Transients Program)를 이용하여 모의하였다.

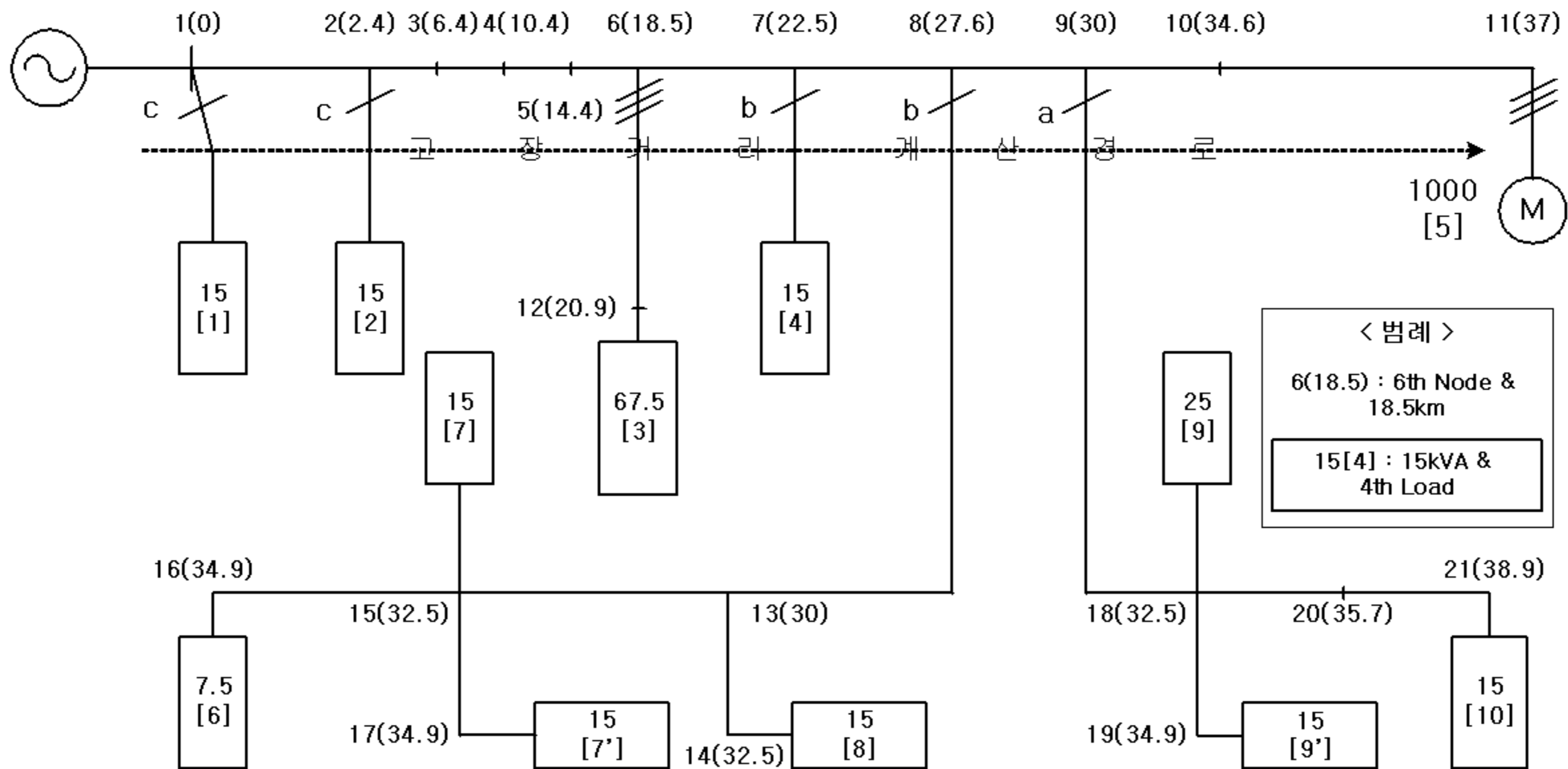
< 표 1. 모의 계통 데이터 >

구 분	정상분(역상분) 임피던스	영상분 임피던스	커패시터
전원 단[Ω]	0.094+j1.392	0.682+j2.981	-
선로[Ω/km]	0.56+j0.831	0.845+j2.742	0.008[μF]

그림 2의 숫자는 고장지점을 표시한 것이면 괄호안의 숫자는 고장거리를 나타낸다. 부하는 임피던

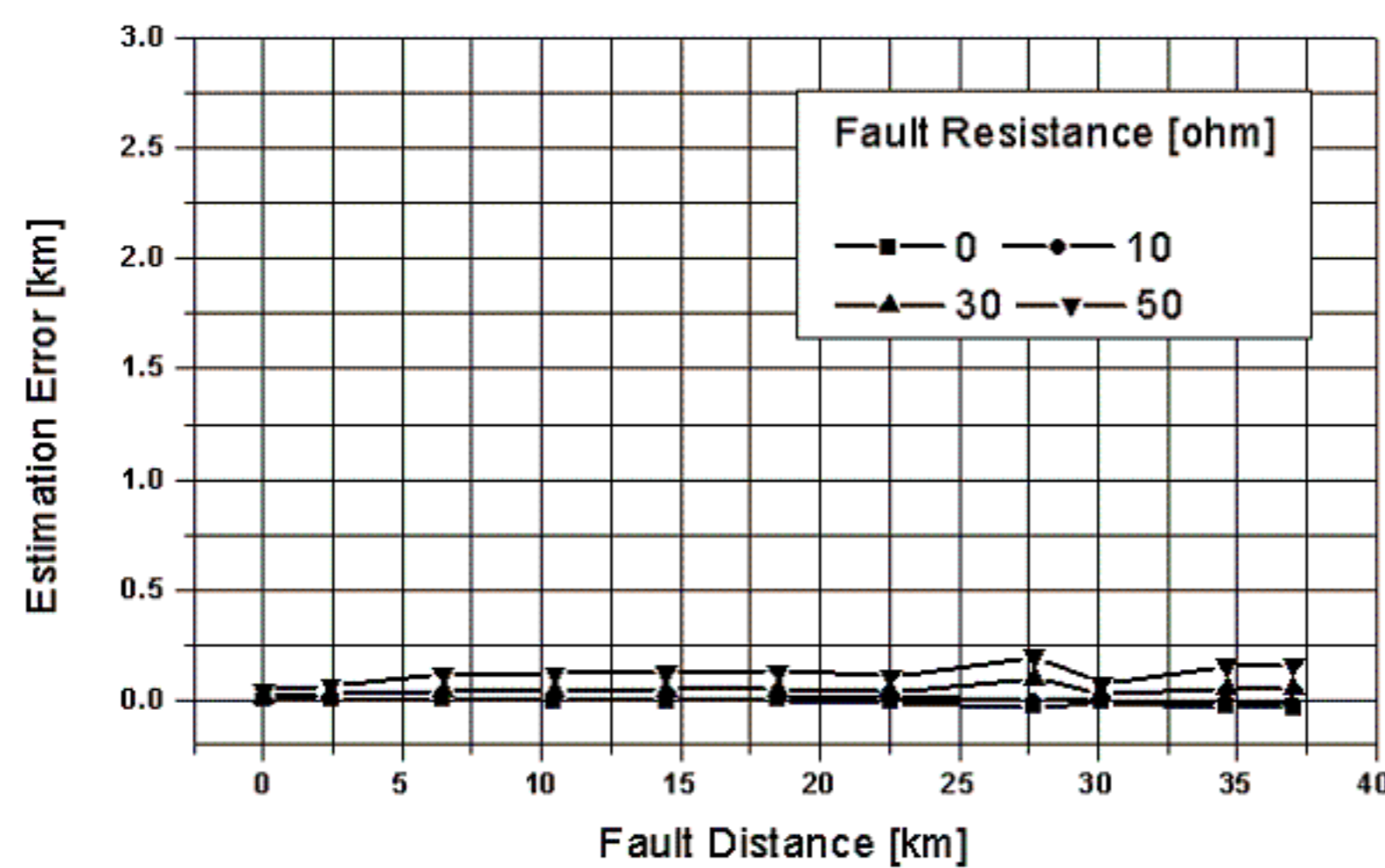
스 부하로 모의하였으며 부하별 어드미턴스 크기를 그림2에 나타내었다. 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수로는 1920Hz, aliasing 에러를 방지하기 위해 960Hz 차단 주파수 특성을 갖는 2차 Butter-worth 저역 통과 필터를 사용하였다. 그리고 전압, 전류 순시 데이터로부터 페이지를 추출하기 위하여 한 주기 데이터 윈도우를 사용하는 DFT를 사용하였다. 고장 거리 추정 에러는 다음 식을 사용하여 산정 하였다.

$$\%Error = \frac{|계산된거리 - 실제고장거리|}{전체선로길이} \times 100 \quad (14)$$

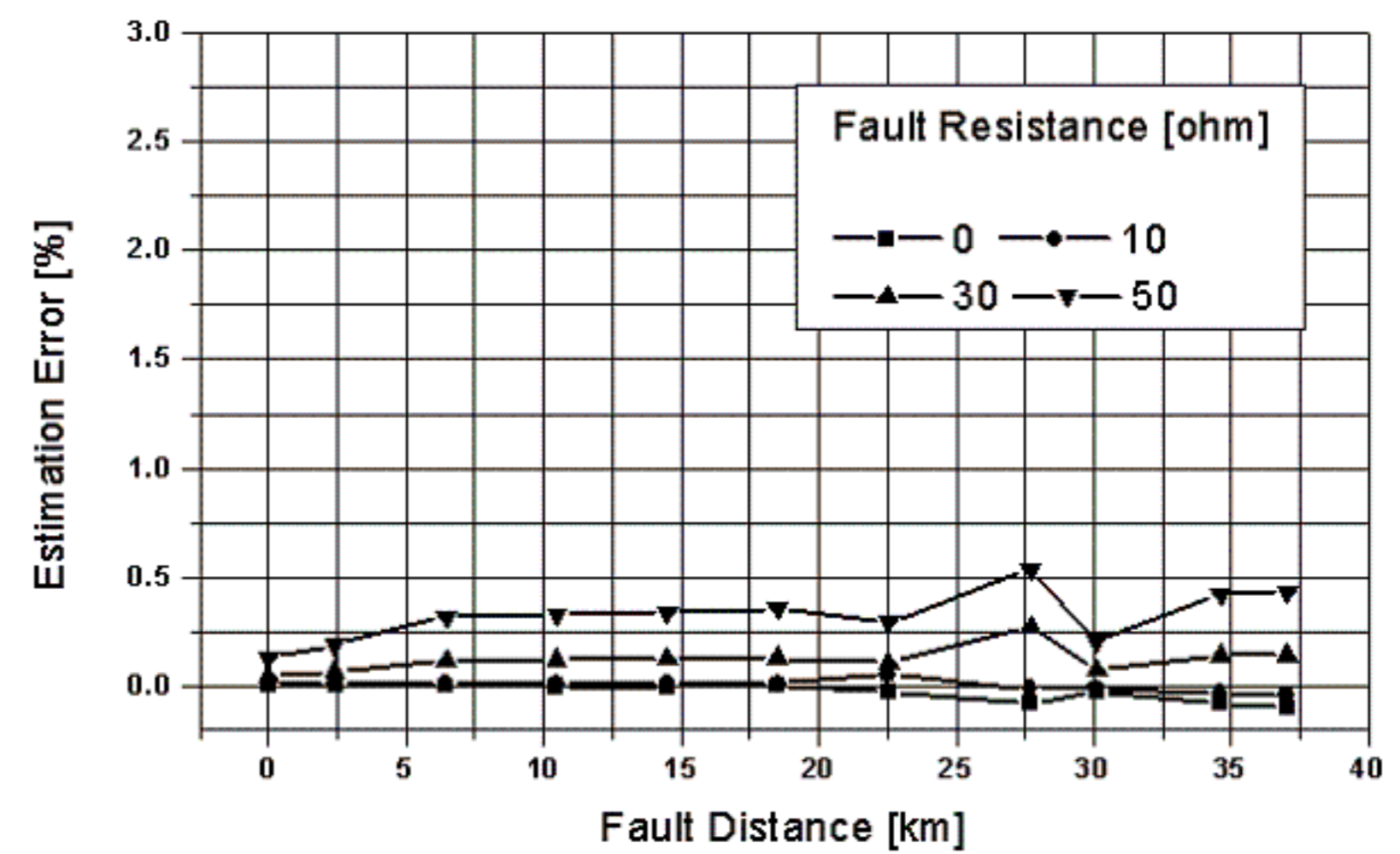


< 그림 2. 실제통을 기반으로 한 사례연구 대상 계통도 >

그림 3은 선간단락 고장 시 제안한 방법에 의한 고장거리 계산 오차를 나타낸다. 최대오차가 8번째 노드, 27.68[km] 지점에서 고장 저항이 50[Ω] 인 경우 0.2[km] 이내이며, 고장저항이 30[Ω] 이하의 경우 0.05[km] 이내로 본 논문에서 제안한 알고리즘이 정확하게 고장거리를 추정할 수 있음을 나타내었다.



< 그림 3 제안한 방법에 의한 계산결과(km) >



< 그림 4 제안한 방법에 의한 오차[%] >

그림 4는 선간단락 고장 시 행렬의 역정리 해석에 의한 각 고장지점에서의 오차를 나타낸다. 최대오차가 8번째 노드, 27.68[km] 지점에서 고장 저항이 50[Ω] 인 경우 0.54[%] 이내이며, 고장저항이 30[Ω] 이하의 경우 0.2[%] 이내로 본 논문에서 제안한 알고리즘이 정확하게 고장거리를 추정함

을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 일반적인 전력공급 선로의 상간단락 고장에 대하여 적용이 가능한 고장거리 산출 알고리즘을 제안하였다. 제시한 알고리즘은 기존의 방법들이 사용하는 대칭 좌표변환을 사용하지 않고 행렬의 역정리를 이용하여 상간단락의 고장거리를 산출하는 방법으로 불평형 계통에도 별도의 보상기법이 필요 없이 적용 가능하도록 하였다. 실제계를 기반으로 한 사례연구를 통하여 제안된 방법은 불평형 계통에서도 적용할 수 있는 알고리즘임을 보였으며, 실제계 적용의 유효성을 입증하였다.

[감사의 글]

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

※ 참 고 문 헌

1. G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa(1994), "Maximum Likelyhood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves", IEEE Transactions on PWRD, Vol. 9, No. 9, pp.680-689.
2. T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakaguchi(1988), " A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part 1 - Fourier Transform Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 3, pp.1316-1323.
3. Yong-Jin Ahn, Myeon-Song Choi, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee(2000), "An Accurate Fault Location Algorithm For Double-Circuit Transmission Systems", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE , Vol.3, pp.1344 -1349.
4. J. Lewis Blackburn(1993), "Symmetrical Components for Power Systems Engineering", New York, Marcel Dekker
5. Jun Zhu, Lubkeman, D.L., Girgis, A.A.(1997), "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders", IEEE Transactions on PWRD, Vol.12, No.2, pp.801 -809.
6. R. Das, M.S. Sachdev, T,S, Sidhu(2000), "A Fault Locator for Radial Sub-transmission and Distribution Lines", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE Vol. 1, pp.443-448.