

계통상태를 고려한 송전선의 ELF 전자계

ELF Electric and Magnetic Fields under the Transmission Line Including Electric Power System States

김 두 현* · 김 상 철**

Doo-Hyun Kim · Sang-Chul Kim

(1996년 3월 16일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

ABSTRACT

This paper presents a study on the analysis and evaluation for ELF(Extremely Low Frequency) electric and magnetic fields under the transmission line according to the power system states. The power system states are classified into two types, normal state resulting from normal operation and alert state from outages. The current in a system is changed continually owing to the load fluctuations even in a normal operation. To calculate the current of the concerned line in a normal state, the system load level is divided into light, base and heavy load level. In case of contingency, an efficient algorithm based on matrix inversion lemma is developed to figure out the current changes. In order to analyze the variations of ELF field caused by the current fluctuations the electrostatic field approach which is far simpler than the electromagnetic field one based on Maxwell equation is introduced in this paper. The suggested method is applied to the IEEE 14 bus system to demonstrate the usefulness.

1. 서 론

안정적인 전력의 공급을 위한 계통의 대형화 및 전압의 초고압화는 전 세계적인 추세이며 다양한 형태로의 전기에너지 사용으로 인하여 모든 생체는 전자계(electric and magnetic fields)에의 노출을

피할 수 없게 되었다¹⁾. 그 중에서도 송변전 설비 및 송전선로 등의 고압전력설비에서 발생하는 초저주파(ELF: Extremely Low Frequency) 전자계는 비록 비전리성 전자파이지만 생체유해성에 관해서 세계적으로 많은 관심을 불러 일으켰으며 상당한 논란의 대상이 되고 있다. 현재 고압송전선

* 충북대학교 공과대학 안전공학과

** 세명대학교 산업안전공학과

로는 750KV 또는 765KV까지가 대표적이지만 우리나라의 경우 345KV, 소련의 경우 1,100KV까지 운용하고 있으며 여러나라가 1,000KV~1,200KV 또는 1,500KV의 송전선로를 건설중이거나 계획중에 있어 ELF전자계의 영향에 대한 다양한 각도에서의 연구가 필요하다²⁾. 송전선로의 전계강도에 영향을 미치는 요인으로는, 지표면에 대한 송전선로의 높이, 송전선로의 기하학적 배치, 송전철탑에 접지된 금속 구조물의 접근 정도, 나무나 울타리 등과 같이 높은 물체의 접근정도, 송전선로의 중심으로 부터 횡방향거리, 지표면에 대한 측정지점의 높이, 송전선로의 전압/전류 등이다³⁾.

본 연구에서는 위의 여러요인 중에서 전압 전류의 변동에 의한 전자계의 변화를 살펴보고자 한다. 전력계통의 일부인 송전선로에 흐르는 전류 및 각 모선의 전압은 정상운전 중에도 부하변동과 같은 원인으로 인하여 항상 변화하고 있다. 특히 단선이나 지락과 같은 계통사고가 발생한 경우에는 전압 전류의 변화는 상당히 심하다. 이와 같이 정상상태(normal state)와 사고로 인한 경계상태(alert state)에서의 전류변화에 따른 전계자계의 변동을 해석하고 분석한다.

2. 연구의 동향

전자계에 대한 연구는 전자계의 정확한 특성 해석을 위한 전자계 계산과 전자계의 생체 유해성 여부를 가리기 위한 두가지 방향으로 진행되어 왔다. 대표적인 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

1975년에 T.M. McCauley는 전하영상법에 기초하여 초고압송전선 아래에 존재하는 물체의 전자계 영향 및 유도전류를 계산하였으며 이에 대한 것을 프로그래밍 하여 계산하는 방법을 개발하였다⁴⁾. 1977년에 R.J. Spiegel은 사람의 신체를 블록 모델로 등가화 시키고 전체적인 방정식을 유도한 후 모멘트 방법을 이용하여 인체 각 부위에 유도되는 전류를 계산하는 방법을 제시하였고⁵⁾, 에너지의 분포와 인체내의 열 발생 문제로 인한 영향까지 조사하였다. 1980년대에 들어서면서 미국의 DOE(Department of Energy), EPRI(Electric Power Research Institute) 등에서 단기간 및 장기간의 영향을 본격적으로 수행하였으나, 전력선의 전자계가 어떻게 인체 건강에 영향을 미치는지에

대한 결론을 내리지 못하고 있다. 단기간의 노출은 분명히 영향이 없으나 장기간에 대한 결과는 측정하기가 매우 불가능하다고 보고하고 있다. 1984년에 A. Chiba, K. Isaka 등을 비롯한 몇몇의 연구자들은 사람을 축 대칭(Axissymmetrical)형태의 등가모델로 만들고 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 인체내에 유기되는 내부전계와 인체 각 부위의 유도 전류밀도를 계산하였다⁶⁾. 1986년에 K.M. Chen등은 유도 표면 전하밀도와 오음의 법칙, 전하의 보존법칙을 이용하여 사람의 자세변화까지 고려한 유도전류를 계산하였다. 특히 이 방법은 기존의 연구자들이 60Hz의 상용주파수에서만 다루어 온 것에 비하여 고주파까지 고려한 수학적 방식을 제공하고 있는 점에서 한층 더 진보된 결과를 제시하고 있다 하겠다⁷⁾. 1983년부터 1985년에 걸쳐 R.G. Olsen 등은 Maxwell 방정식과 회로이론을 이용한 Carson's Theory를 이용하여 송전선로의 전자계의 결합 특성 및 파동 임피던스를 해석하였고 인체에 대한 안전성 평가에 관한 연구를 발표하였으며⁸⁾, 1984년 K.C. Jaffa 등은 선이 대지위 전기장에 놓여 있다는 가정하에 간단한 테브닌(Thevenin) 등가회로를 이용하여 인체에 미치는 세로수직 전계·자계 유도값과 전류값에 대하여 계산하였으나⁹⁾ 이러한 결과는 오직 짧은 선에서만 적당한 결과를 가져오기 때문에 무한장선로이거나 실질적인 송전선에 있어서의 적용에는 그 한계가 있다.

그러나 이들 대부분의 연구들은 전력계통의 불확실한 변동을 고려하지 않고 단순히 송전선로가 독립되어 있는 경우로 가정하여 해석을 해왔다. 실제로 송전선로의 전류나 모선의 전압은 항상 변화하고 있으므로 이들의 영향을 고려할 수 있는 방향으로 연구가 진행되는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 계통의 영향을 고려하기 위하여 전력계통의 일부로서 송전선로를 선택하였으며, 계통의 상태를 첫째, 정상운전을 수행하고 있는 정상상태와 둘째, 계통의 일부요소의 고장으로 야기되는 경계상태로 구분하여 그 영향을 해석하고자 한다. 계통의 사고에는 모선사고, 선로사고로 크게 구분할 수 있다. 그러나 일반적으로 많이 발생하는 사고는 주로 선로사고라고 할 수 있다. 어느 경우의 사고이든 모두 전력 조류계산을 수행함으로써 사고시의 계통의 영향을 정확히 파악하여 선로전류

나 모션전압을 정확히 알 수 있으며 또한 사고에 대한 대책을 강구할 수 있게 된다. 그러나 이와같이 모든 경우의 사고에 대하여 조류계산을 수행하는 것은 많은 양의 계산시간이 요구되기 때문에 비효율적인 방법이다. 이러한 사고의 영향을 해석하기 위한 방법으로 전력주입법(power injection method)과 역행렬 수정법(matrix inversion lemma)이 이용된다. 본 연구에서는 역행렬 수정법을 이용한 엘고리즘으로 해석하며 가장 변동이 심한 사고사례를 선정하여 전자계 해석을 행한다.

3. 역행렬 수정법

역행렬 수정법의 특징은 행렬의 요소가 변화했을 경우에 역행렬을 다시 구하지 않고 직접 역행렬을 조정함으로써 계산시간을 빠르게 할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 계통의 문제에 있어서 상정사고 해석의 경우 계통의 구조는 선로가 끊어짐으로 인하여 변하게 되는데 이때, YBUS의 구조는 전체 계통에서 한 선로가 없어진 경우이다. 이러한 경우에 YBUS 전체의 역행렬을 다시 구한다는 것은 시간의 낭비이며, 기존에 있는 역행렬로부터 행렬의 조작에 의해서 사고상태의 새로운 역행렬을 구할 수 있다면 상당한 계산시간의 단축이 예상된다. 따라서 실제의 상정사고 해석에 있어서는 초기조류계산에서 자코비안 행렬의 역행렬이 구해져 있으므로 이를 이용하여 새로운 자코비안 행렬의 역행렬을 쉽게 구할 수 있다. 즉, 조류계산에 있어 역행렬계산이 전체 조류계산시간에서 차지하는 비중이 상당히 크므로 역행렬 수정법을 이용하게 되면 계산시간이 상당히 줄어들게 된다. 또한, 이를 이용한 조류계산의 결과는 일반적인 분할 조류계산(decoupled load flow method)과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

역행렬수정법의 정식화 과정은 다음과 같다.

일반적인 조류계산식을 선형 대수방정식으로 나타내면 식(1)과 같이 표시된다.

$$[R] = [B_0] [E_0] \quad (1)$$

이 방정식의 해는 식(2)로 주어진다.

$$[E_0] = [B_0]^{-1} [R] \quad (2)$$

이때 행렬 $[B_0]$ 의 요소중에서 I번째와 J번째 행렬의 요소 즉, $B(I,I)$, $B(I,J)$, $B(J,I)$, $B(J,J)$ 가 변한 경우의 관계식을 보면 식(3)과 같다.

$$[B_0] = [B_0] + b[M]^T [M] \quad (3)$$

여기서,

$[B_0]$: 분할 조류계산의 초기 자코비안 행렬

$[B_1]$: 분할 조류계산의 수정된 자코비안 행렬

b : $-y_{ij}$ (y_{ij} : 선로 혹은 변압기의 어드미턴스)

$[M]$: I번째 요소 $M(I)=1/T_i$ 와 J번째 요소 $M(J)=-1$ 을 제외한 모든 요소가 0인 행벡터 (row-vector)

T_i : 선로의 우측에서 본 비공칭탭 변압기의 변압비, 변압기가 없는 경우에는 $T_i=1$ 이다.

새로운 자코비안의 역행렬과 초기 자코비안의 역행렬과의 관계는 식(3)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$[B_1]^{-1} = [B_0]^{-1} - c[X] [M] [B_0]^{-1} \quad (4)$$

단, $c : (1/b + [M] [X])^{-1}$

$$[X] : [B_0]^{-1} [M]^T$$

즉, 새로운 조류계산식의 해는 초기 조류계산의 자코비안 역행렬을 이용하여 다시 자코비안 역행렬을 구하지 않고 해를 구할 수 있음을 다음의 관계식에서 알 수 있다.

$$[E_1] = [B_1]^{-1} [R] \quad (5)$$

$$[E_1] = ([B_0]^{-1} - c[X] [M] [B_0]^{-1}) [R] \quad (6)$$

식(2)를 이용하면 식(6)은 다음과 같다.

$$[E_1] = [E_0] - c[X] [M] [E_0] \quad (7)$$

단, $[E_0] = [B_0]^{-1} [R]$

여기에서 $[R]$ 은 사고상태의 전력편차량이다.

4. 송전선하의 전·자계 계산

전계 및 자계를 표현하는 방법으로 Phasor와 벡터의 개념이 자주 사용되게 된다. 하나의 vector는 공간내에서 각과 크기에 의해 표현되는데 반해 phasor는 시간내에서 크기와 각에 의해 서술된 사인시간변화를 가지는 양이 된다. 벡터는 고딕체 글씨 위에 화살표로 표시되며 또한 시간사인함수인 $[e(t)]$ 로 표시되기도 한다.

전계는 3개 직각좌표를 따라 공간요소에 의해 정의되는 전계 세기의 벡터계이다. IEEE의 전기·전자학 용어사전에서는 전계를 “전계강도 또는 전기적인 흐름밀도의 벡터계”라고 정의하고 있다. 전계는 전하가 다른 전하에 영향을 미치는 힘을 대표하는 것이며 전압의 크기에 따라 비례하는 성질을 가지고 있다. 즉 전압이 높아질수록 전계는 그

만큼 강해지고 전계의 강도는 전압을 띠고 있는 도체로부터 거리의 제곱에 따라 감소한다. 따라서 전계강도는 도체로부터의 거리가 증가함에 따라 급격하게 감소한다.

정적상태의 사인계에 대하여 각 공간요소는 rms 값 v/m 이며 식(8)에서 표현될 수 있는 phasor이다.

$$\vec{E} = e_x(t)\vec{u}_x + e_y(t)\vec{u}_y + e_z(t)\vec{u}_z \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z$ 는 x, y, z축의 단위벡터이며, $e_x(t), e_y(t), e_z(t)$ 는 phasor이다. 식(9)에서 보여주는 시간함수는 x공간요소에 대한 것이다.

$$e_x(t) = E_x \cos(\omega t + \varphi_x) \\ = E_{x,r} \cos \omega t + E_{x,i} \sin \omega t \dots\dots\dots (9)$$

여기서 E_x 는 크기가 되고 φ_x 는 $e_x(t)$ 의 위상각, 그리고 $E_{x,r}, E_{x,i}$ 는 각각 실수부와 허수부가 되며 이 표현들은 공간내에서 벡터 움직임으로서 식(8)에 의해 표현된 벡터 \vec{E} 를 가시화하기 위하여 이용된다.

또한 자계는 IEEE의 전기·전자학 용어사전에서 "curl은 전류밀도이고, 그것은 완전히 자기화된 물체에서는 자기흐름 밀도에 비례하는 vector point function"이라고 말하고 있다. 자계의 표현 방법에 있어서는 자계의 세기($H=B/\mu$)보다 오히려 자속밀도(B)가 송전선의 도체에 흐르는 전류에 의해 발생된 자계를 묘사하는데 더 익숙하다. 따라서 본 연구에서는 자계를 자속밀도의 벡터계(B-field)로서 정의하고자 하였다.

본 연구에서 다루고 있는 인공자계는 전계의 경우와 마찬가지로 할 수 있다. 다른점은 전계강도는 송전선의 전압과 관계가 있지만 자계강도는 송전선에 흐르는 전류에 따라 변하기 때문에 하루 동안에도 상당히 변화할 수 있으며 대지는 비자성체이기 때문에 자계는 대지의 영향을 거의 받지 않는다는 것이다. 따라서 ELF자계는 수직 및 수평 성분을 동시에 가지게 되고 대부분의 물체와 건물에 대해서도 차폐되지 않으며 지중케이블에서 발생한 자계도 대지에 의해서 차폐되지 않는다. ELF 전자계를 해석하는 방법에는 여러가지가 있으나 본 논문에서는 정전계적인 해석방법을 도입하였는데, 이는 전계와 자계간의 연결(coupling)이 없어진다고 가정할 수 있기 때문에 해석이 매우 용이하다. 완벽한 전자계해석은 현실적으로 어려움이 많은 것이 사실이므로 보다 간단한 해석기법

을 이용하여 전자계를 계산하고자 하였으며, 본 연구의 목적을 달성함에 있어서 충분한 결과를 제공할 수 있는 것으로 사료된다. 정전계적으로 해석하는 방법에 대한 수식화는 참고문헌¹⁰⁾에 제시되어 있다.

5. 사례연구 및 고찰

본 연구에서 제시한 방법의 효용성 및 가능성을 평가하기 위하여 사례연구 대상으로 5대의 발전기와 20개의 선로로 구성되어 있는 IEEE 14 모선 계통을 도입하였다. IEEE 14 모선 계통의 계통도는 Fig. 1과 같다. 계통의 여러 선로중에서 비교적 전류의 흐름이 많은 모선4와 모선5 사이의 선로(선로번호:7)를 전자계 해석의 대상으로 선정하였다. 전자계 해석을 하기 위한 기본적인 자료는 Table 1과 같으며 본 연구에서는 선로고장과 부하 변동에 따른 전압, 전류변동율을 구하여 Table 1에서 정해진 공칭전압과 공칭선로 전류값에다 변동율을 곱하여 최종값으로 정하였다. (예를들면, 공칭선로전류 1000A시 전류변동율이 52.2%인 경우 522A로 설정)

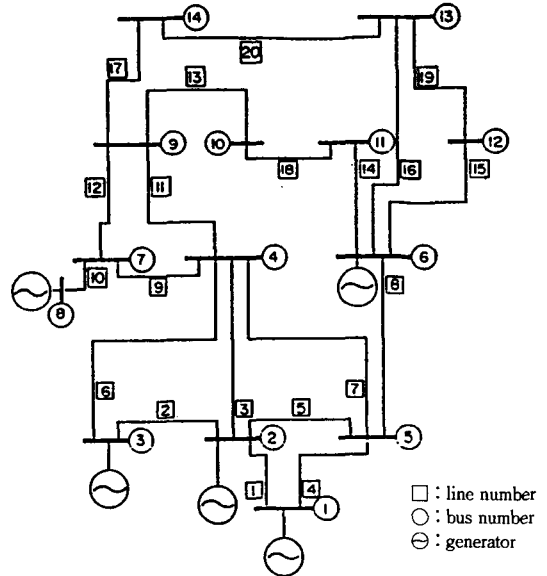


Fig. 1 Schematic diagram of IEEE 14 bus system

Table 1 Parameters of line configuration

Parameter	765KV/2 회선 역상
공칭 전압	765 KV
공칭 선로전류	1000 A
도체 수	4
소도체 반지름	1.48 cm
도체간의 거리	45.72 cm
선간거리	10.4 m
송전선 높이	30 m
	42.79 m
	55.58 m

5.1 정상상태

정상운전을 하고 있는 계통에서의 전압 전류 변동을 나타내기 위하여 계통의 부하수준을 3가지 즉, 기저부하와 기저부하의 50%인 경부하, 그리고 150%인 중부하로 구분하였다. 이들 부하수준에 대한 선로전류의 추이는 Fig. 2에서 제시되며, 모선 전압의 변화는 Fig. 3에 제시되어 있다. 또 관심선로인 7번선로의 전류변화와 4번 모선의 전압변화에 따른 전기 및 자기해석 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

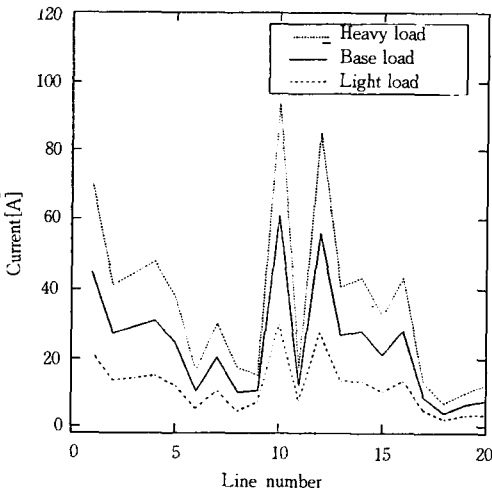


Fig. 2 Line current changes according to load level in the model system

5.2 경계상태

전력계통에 일어날 수 있는 사고의 경우를 미리

상정하여 그 대비책을 강구하기 위한 해석법이 상정사고해석(contingency analysis)이다. 본 연구에 있어서는 다양한 형태의 사고 중 단일선로 사고만을 고려하여 해석하고자 한다. 계통에서 임의의 한 선로가 단선이나 지락사고를 일으킬 경우 선로 전류 및 모선전압의 변동을 가져오며 그 심각도에 따른 적절한 대책을 마련하여야 한다. 관심선로(7

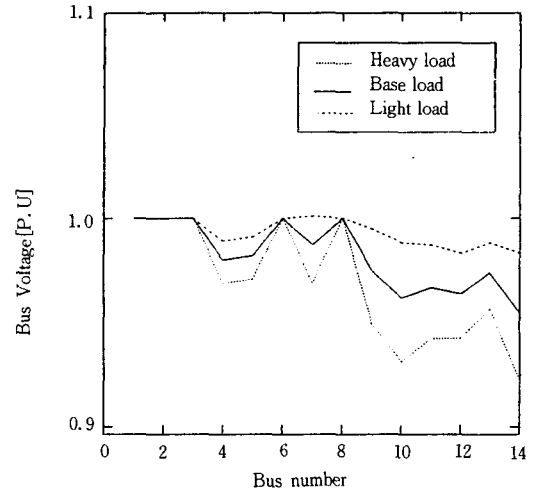


Fig. 3 Bus voltage changes according to load level in the model system

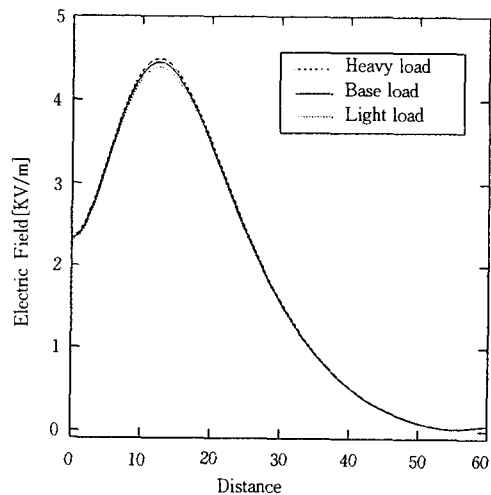


Fig. 4 Electric field intensity according to load level in the model system

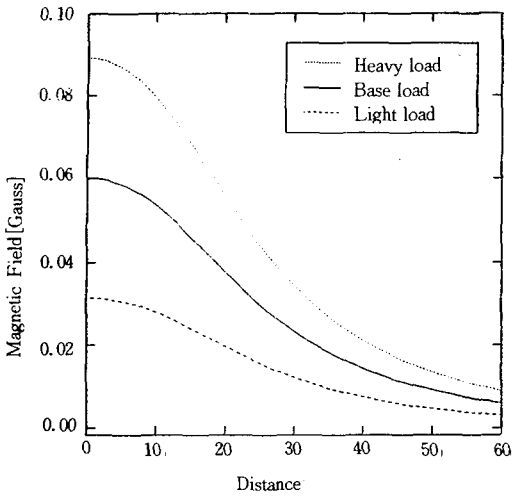


Fig. 5 Magnetic field intensity according to load level in the model system

번선로) 이외의 선로들에 사고가 발생한 경우 관심선로에서의 전류변화비는 정상상태에서 전류를 기준으로 할 때 Fig. 6과 같고, 7번선로가 연결되어 있는 4번 모선의 전압변화비는 정상상태에서의 모선전압을 기준으로 구하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 Fig. 6의 결과는 7번 선로가 고장난 경우를 기준으로 전류의 변동폭을 구한 그래프이기 때문에 7번 선로의 전류변동율을 zero로 표현하였다.

또한 전압의 변화가 가장 심한 사고의 경우(13번 선로사고)를 선택하여 전계를 계산하였으며 그 결과를 정상상태 기저부하시의 전계와 비교하여 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8에 나타난 바와같이 전압의 변화가 가장 심한 경우, 정상상태보다 약간 높은 수치를 보여주고 있으며 이는 전압의 변동폭이 선로고장시 계통에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 반대로 자계의 경우에 있어서는 계통에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 전류의 변동이 가장 심각한 사례(1번 선로사고)를 선정하여 그 결과를 정상상태 기저부하시의 자계와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

본 연구에서 상정한 계통상태의 사례연구를 한 결과 1번 선로의 고장시, 관심선로 7번에 흐르는 전류는 정상상태의 배가 조금넘는 2,070A가 선로에 흐르는 것으로 계산되었으며, 13번 선로가 고

장났을 경우 전압은 787KV를 나타내고 있어 전압의 변동폭이 거의 없음을 보여주고 있다. 또한 계통상태의 고장시 전계의 값은 거의 변동이 없는 것으로 나타났으나 자계의 경우에 있어서는 정상상태 보다 변동폭이 최고 241% 나타내고 있다.

정상상태에 있어서 부하와 관련된 전류와 전압의 변화는 7번 선로를 기준으로 경부하시 전류변동율 52.2%, 전압변동율 1%로 각각 나타났으며,

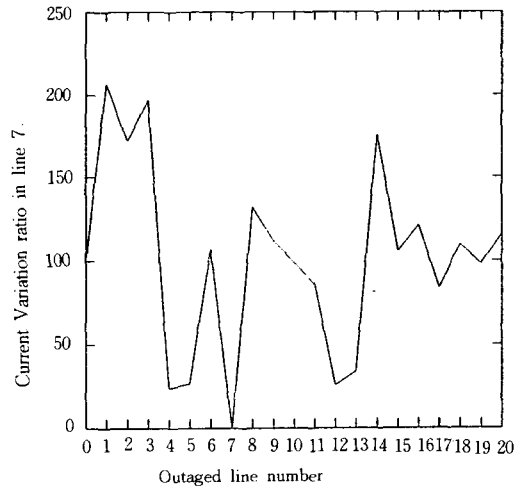


Fig. 6 Current variations on the concerned line (line number 7)

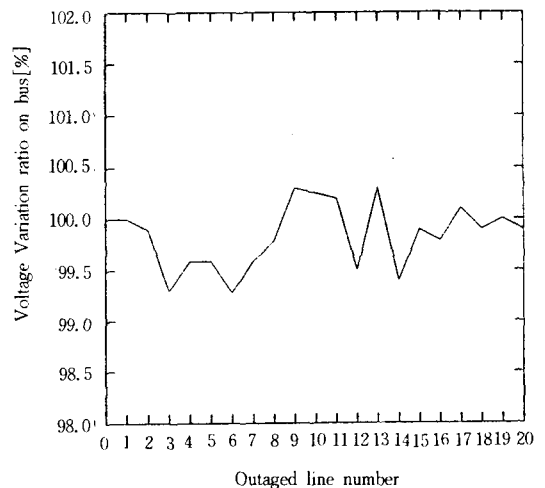


Fig. 7 Voltage variations on in the bus 4

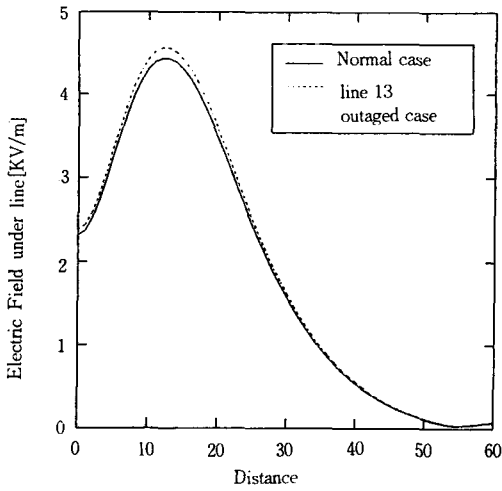


Fig. 8 Electric field intensity of the severest case and the base case

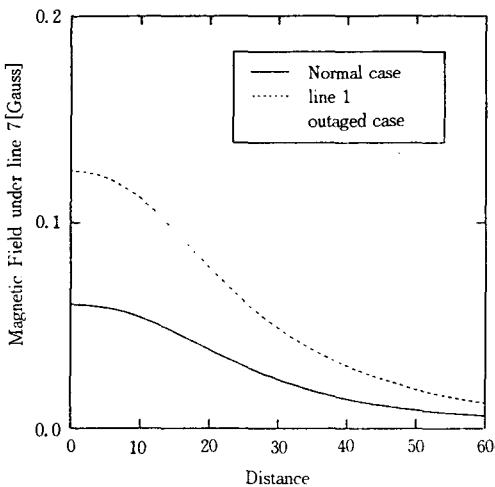


Fig. 9 Magnetic field intensity of the severest case and the base case

중부하시의 전류변동율은 155.6%로 나타났으나 전압변동율은 경부하시의 마찬가지로 변동이 거의 없는 것으로 나타났다.

6. 결 론

현재까지 전자계의 해석에 있어서는 전력계통의

불확실한 변동을 고려하지 않고 단순히 송전선로가 독립되어 있는 경우에 한하여 전자계를 해석하였으나 실제로는 송전선로의 전류나 모선의 전압은 항상 변화하고 있으므로 본 연구에 있어서는 계통상태를 고려하여 선로고장시 전류 및 전압의 변화와, 부하변동에 따른 전류, 전압의 변동폭을 정제적인 방법을 이용하여 구한 결과,

- 1) 선로고장시 최대전류값은 2,070A로서 기저전류에 대하여 상당히 높은 전류값을 나타내었다.
- 2) 부하변동에 따른 전류의 변동에 있어서도 경부하시 52.2%, 중부하시 155.6%로 변동폭이 크게 나타났다.
- 3) 전계의 변동은 낮게 나타났으나 자계의 경우에 있어서는 최고 241%까지 높게 나타났다.

본 연구에 있어서는 고장을 1개의 선로로 국한한 단일사고였으나 앞으로의 연구에 있어서는 여러개의 선이 동시에 고장나는 다중사고와 실 계통상태를 고려하고자 하며, 사례연구를 통하여 고장 종류에 따라 전자계의 변화가 매우 불규칙하게 변화함을 알 수 있었다. 앞으로 전자계를 해석하여 생체안전평가를 함에 있어서도 이러한 사실을 유념하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) D. W. Zipse, "Health Effects of Extremely Low-Frequency (50-and 60-Hz) Electric and Magnetic Fields" IEEE Trans. Indus. App., Vol. 29, No. 2, MARCH/APRIL 1993.
- 2) 김정부, 민석원, "환경장해 측면에서 765KV (2회선) 차기 초고압 송전선 도체 선정에 관한 연구", 전기학회지, Vol. 35, No. 8, 1986.
- 3) 김석주, "ELF전자계의 인체 유해성" 전기학회지 Vol. 41, No.7, 1992.
- 4) T. M. McCauley "EHV and UHV Electrostatic Effect : Simplified Design Calculations and Preventive Measures" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-93, No. 5, Sept. 1974.
- 5) R. J. Spiegel, "Magnetic couplig to a prolate spheroid model of a man", IEEE Power and Eng. society, Paper No. F76 564-0, Jan.

- 1976.
- 6) Atsuo Chiba et al, "Application of finite element method to analysis of induced current densities inside human model exposed to 60Hz electric field", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-103, No. 7, July, 1984.
 - 7) Kun-Mu Chen et al, "Quantification of interaction between ELF-LF electric fields and human bodies", IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. BME-33, No. 8, Aug. 1986.
 - 8) R.G. Olsen et al, "Characteristics of Low Frequency Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines" IEEE Trans. Power Del. Vol. 7, No. 4, Oct. 1992.
 - 9) Kent C. Jaffa et al, "electromagnetic coupling from power lines and magnetic field safety analysis", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-103, No. 12, Dec. 1984.
 - 10) 김두현, 김상철, "ELF전자계 특성 및 인체 안전에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 8, No. 3, 1993.
-