

계통상태를 고려한 ELF 전자계의 인체안전평가를 위한 퍼지언어변수 접근법

Fuzzy Linguistic Variable Based Approach for Safety Assessment of Human Body in ELF Electromagnetic Field Considering Power System States

김 상 철*·김 두 현**·고 은 영***

Sang-Chul Kim · Doo-Hyun Kim · Eun-Young Ko

(1996년 12월 12일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

ABSTRACT

This paper presents a study on the fuzzy linguistic variable based approach for safety assessment of human body in ELF electromagnetic field considering power system states. To cope with the demand in modern industry, the power system becomes larger in scale, higher in voltage. The advent of high voltage system has increased the relative importance of field effects.

The analysis of ELF electromagnetic field based on Quasi-Static Method is introduced while the power system is included to model the expected and/or unexpected uncertainty caused by the load fluctuation and parameter changes. In order to analyze the power system, Monte Carlo simulation method and contingency analysis method are adopted in normal state and alert state, respectively. In the safety assessment of human body, the approach based on fuzzy linguistic variable is employed to overcome the shortcomings resulting from a crisp set concept. The suggested scheme is applied to a sample system(modified IEEE 14 bus system) to validate the usefulness.

* 세명대학교 공과대학 산업안전공학과

** 충북대학교 공과대학 안전공학과

*** 충북대학교 대학원

1. 서 론

산업의 고도성장파 더불어 날로 급증하고 전기 수요에 양질의 전력을 공급하기 위해서 계통의 대형화 및 전압의 초고압화는 이미 모든 나라에서 현실로 등장하고 있다. 고압 전력설비에서 발생하는 초저주파(ELF : Extremely Low Frequency) 전자계의 인체유해론은 상당한 논란의 대상이 되어 오고 있다¹⁾.

ELF 전자계 연구의 유형은 생리학, 질병 그리고 행동에 대한 영향을 찾기 위하여 행하여져 왔다. 그러나 현재까지 확실하게 인체의 유해성을 지지할만한 연구는 발표되지 않고 있으며 개인과 나라마다 각기 다른 내용과 기준치를 제시하고 있는 등 국내외적으로 이 분야에 많은 연구가 발표되고 있다^{2~4)}.

국내외적으로 발표된 기존의 연구들은 독립된 송전선로에 대한 전자계해석 및 인체평가를 수행한 결과를 제시하고 있는데, 이는 계통의 불확실성이 전혀 고려되어 있지 않은 상태이다. 실제로 전력계통은 부하변동이나 예상밖의 사고로 인하여 송전선로의 전류 및 전압이 항상 변화하고 있으며, 이들을 올바르게 고려하기 위해서는 전력계통의 일부분으로서 송전선로하에서 전자계를 해석하고 그 영향을 평가하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 계통의 영향을 고려하기 위하여 그 상태를 정상운전을 수행하고 있는 정상상태와 계통의 일부요소 고장으로 야기되는 고장상태로 구분한다.

정상상태의 부하변동을 모델링하기 위하여 통계적 접근방법인 Monte Carlo Simulation 방법을 이용하였다. 조건부 확률밀도함수, 특정한 전류 값을 가질 확률을 나타내는 전류의 확률분포함수, 자계 확률밀도함수 및 전류 확률밀도함수를 이용하여 누적확률분포를 구하며 철탑으로부터 떨어진 점에서의 자계값은 누적확률분포 그래프상의 특정값으로 설정하였다.

고장상태를 야기시키는 계통의 고장으로서 단일 선로사고만을 상정하였으며 상정사고해석(contingency analysis)법을 통하여 관심 송전선로에서의 전압 전류변동 특성치를 구하였다⁵⁾. 이러한 방법을 토대로 인체안전 평가를 실시하고 기존의 보통 집합(crisp set)이론에 근거한 안전기준치를 탈피

하기 위한 방법론을 도입한다. 인간에 대한 전자계의 영향유무는 어느 한 기준치를 벗어난다고 위협하다 안전하다는 느끼는 것이 아니므로 기존의 권고안은 인체 안전기준치로는 다소 불합리한 점이 있다. 이러한 단점을 보완하고 실질적으로 인간이 위협을 느끼는 감각을 퍼지 언어변수^{6~8)}를 이용하여 제시하고자 한다. 퍼지 언어변수의 적용에 있어서는 먼저 본 연구⁴⁾ 적합한 퍼지 변형자 함수를 생성하고 이 함수를 이용하여 퍼지 집합의 소속함수값을 구하고 소속함수에 의한 안전기준치의 설정이 적합한 것인가를 퍼지 정성자 용어를 이용하여 분석하였다.

2. ELF 전자계 해석

전력선에 존재하거나 또는 전력선에 의해 유도되는 전류 및 전하에 의해 만들어지는 전자계는 Maxwell 방정식에 의하여 그 특성이 주어진다.

일반적으로 전계와 자계는 서로 결합되어(coupled) 있으나, 송전선 부근의 전자계인 경우에는 시간에 따른 계의 변화가 매우 느려 Maxwell 방정식을 정전계와 정자계로 분리하여 해를 구하는 준정전법(Quasi-static method)을 도입할 수 있다⁹⁾. 준정전법에 의한 정전계와 정자계의 크기는 송전선로의 정현파 전류의 주파수에 따라 진동하게 된다. 송전선로의 전자계를 해석하기 위하여 지면의 영향을 무시한 2차원 해석법을 사용하는 경우 송전선로를 Fig. 1과 같이 송전선로의 방향(z축)으로 무한한 수의 쌍극자가 배열되어 있는 모델로 가정하여 해석할 수 있으나, 그 결과를 나타내는 식은 매우 복잡하다⁹⁾.

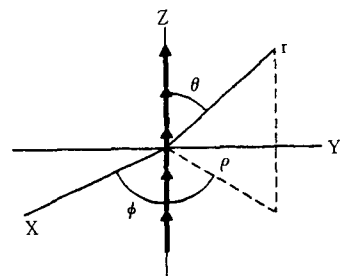


Fig. 1 Model of Transmission Line using Dipoles

송전선로는 자유공간상에 무한한 길이를 갖는

도체이며, 공간상에서 일정하고 시간에 대한 정현파 함수인 식(1)의 균일전류 I(t)가 흐른다고 가정한다.

$$I(t) = I \cdot \cos(\omega t) \dots\dots\dots (1)$$

적분형 암페어 법칙(Ampere's law), 식(2)에 따르면

$$\int_c \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \int_s (\vec{J} + j\omega \epsilon_0 \vec{E}) \cdot d\vec{s} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 \vec{J} : 전류밀도
 c : 도체에 중심이 있는 반경 ρ 인 원
 s : c 의 면적

대칭성으로 인해 \vec{B} 의 다른 성분 B_ρ 및 B_z 는 0이 되므로 좌측항은 $2\pi \rho B_\phi$ 가 된다. 오른쪽의 두번째 항은 선로로 흐르는 전류외에 다른 전류가 없기 때문에 무시하면, 우측항은 선로의 총전류 $I(t) = I \cos(\omega t)$ 로 간단하게 된다. 따라서 식(2)는 식(3)으로 된다.

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I \cos(\omega t)}{2\pi \rho} \dots\dots\dots (3)$$

식(3)은 동일한 조건하에서 정확한 해석을 통하여 얻어지는 결과식에 $k\rho \ll 1$ ($k = 2\pi/\text{파장}$)를 적용한 식과 동일하며, 이는 준정전법에 의한 결과와 일치한다.

식(3)을 이용하여 송전선로 방향과 횡면인 xy평면에 존재하는 정전계식을 유도하기 위해서 미분형 Faraday 법칙을 적용할 수 있다. 그러나 식(1)과 같이 선로전류가 송전선로를 따라 일정하다고 가정한 경우에는 이미 전자계와 정전계는 비결합된 상태이므로 정전계를 구할 수가 없다. 좀더 실질적으로 식(3)과 같이 공간과 시간에 따라 전류가 변화하는 진행전류파를 가정한다.

$$I(z, t) = I \cdot \cos(\omega t - \gamma z) \dots\dots\dots (4)$$

식(4)로 표시되는 전류분포를 이용하면 자계는 z 의 함수가 되므로, 전계와 자계사이에는 식(5)로 표현될 수 있다.

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \nabla \times \vec{B} = -\vec{a}_\rho \frac{\partial B_\phi}{\partial z} + \vec{a}_z \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho B_\phi}{\partial \rho} \dots\dots\dots (5)$$

이제 전계의 횡면성분이 존재하며 이것이 정전계가 된다. 식(4)로 주어지는 전류를 식(3)에 대입하면 전계의 xy평면 성분은 식(5)로부터 다음 식(6)으로 정리된다.

$$\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_\rho}{\partial t} = -\frac{1}{2\pi \rho} \frac{\partial}{\partial z} (I \cos(\omega t - \gamma z)) \dots\dots\dots (6)$$

또한 식(7)로 표현되는 전류연속방정식을 적용하면 식(6)은 식(8)로 정리된다.

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho_L(z, t)}{\partial t} \dots\dots\dots (7)$$

$$E_\rho = \frac{\rho_L(z, t)}{2\pi \epsilon_0 \rho} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 z 방향으로 전류분포가 일정하다면 식(9)로 표시되며, 정전계를 나타낸다.

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi \epsilon_0 \rho} \vec{a}_\rho \dots\dots\dots (9)$$

여기서 단위 벡터 \vec{a}_ρ 는 원통 좌표계의 방사상 방향이며, ρ_L 은 선전하밀도이다. 원칙적으로 거리에 따른 자계의 변화를 알면 기지의 자계로부터 전계는 식(10)으로 부터 구해지나 거리에 따라 정확하게 자계의 차(변화)를 측정하는 것이 실질적으로 어렵다.

$$\mu_0 \epsilon_0 \omega E_\rho \doteq \frac{\Delta B_\phi}{\Delta z} \dots\dots\dots (10)$$

예를 들면 전계가 10kV/m, 주파수가 60Hz, 자계측정지점 사이의 간격이 1km이면 자계의 차, ΔB_ϕ 는 0.042 μ T 또는 0.42mG로 측정되어야 한다. 그러나 전류의 시간적 변화 및 타자계, 기하학적 변칙성등으로 인하여 1km의 거리에 걸쳐 정확하게 그 차를 측정하는 것은 불가능하다. 이러한 이유로 송전선로에 있어 전계 및 자계는 마치 결합되어 있지 않는 것처럼 자계는 전류에 의해 결정되어지고 전압에 의해 전계가 결정되어지는 것으로 처리된다.

3. 계통상태 해석

전자계 해석에 있어 대부분의 연구들은 전력계통의 불확실한 변동을 고려하지 않고 마치 송전선로가 독립되어 있는 것으로 모델링한 독립송전선로에 대한 해석을 행하여 왔다. 실제로 송전선로의 전류나 모선의 전압은 전력계통에 연결되어 있는 부하 및 전원의 변동에 따라 항상 변화하고 있으므로 이들의 영향을 고려할 수 있는 방향으로 연구가 진행되는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 송전선로를 전력계통의 한 요소로 간주하고 계통 파라미터의 변동에 따른 영향을 선로의 전압과 전

류변동으로 환산하여 전자계를 해석하여야 한다. 본 연구에서는 전력계통의 상태를 정상운전을 수행하고 있는 정상상태(steady state)와 심각한 전압 전류 변화를 야기시키는 계통 일부요소의 고장에 따른 고장상태(alert state)로 구분하여 그 영향을 해석한다.

3.1 정상상태

정상상태에서의 전자계를 해석하는 방법으로는 여러 가지가 있으나 크게 두 가지로 구분하면, 전압 및 전류가 일정하다는 가정 하에서 전자계를 해석하는 방법과 전압, 전류가 시간 및 계절과 부하에 따라 변화한다는 가정 하에서 해석하는 방법이 있다. 송전선로를 흐르는 전류 및 선로의 전압은 부하변동에 따라 항상 변화하고 있으므로 전자계를 해석할 때 그 영향을 고려하는 것이 바람직하다. 특히 부하변동에 따른 전류의 변화는 무시할 수 없는 정도이므로 전류에 의해 크게 좌우되는 자계는 부하변동에 따른 전류변화의 영향을 적절하게 반영하여 해석되어야 한다. 그러나 불규칙적으로 변화하는 부하를 계산하고 이에 따른 전류의 변화를 계산하는 것은 매우 어려운 일이다. 이는 전력부하에 대한 요구가 일일 그리고 연중으로 불규칙적으로 변화하며 송전선로의 전류가 일반적으로 평형상태를 유지하지 못함으로 인해 일어나는 불규칙 현상에 기인된다. 이것은 한 부하의 상(Phase)이 한 쌍의 도체와 연결되어 있기 때문이며 중성선을 통하여 흐르는 전류가 있는 경우 삼상계통은 평형상태로 되지 않는다. 이때 발생하는 전류가 귀로전류이며 이러한 전류들은 자계에 대하여 충분한 영향을 줄 수 있다고 알려져 있다. 따라서 전류를 부분적으로 예상하는 것이 불가능하며 송전선의 자계를 결정하는 것은 어렵게 되고 한 순간의 자계를 측정하는 것은 불가능하다. 이러한 불규칙한 자계값을 좀 더 확실하게 해석하기 위하여는 전류불평형과 연중 전류변화에 대한 확률적 기법을 도입하여 전류의 변화에 의한 자계의 확률분포를 계산하여 자계값을 구하는 것이 좀 더 적절한 방법이라 할 수 있다. 본 논문에서는 Monte Carlo Simulation 방법을 이용하여 전류의 불규칙성을 모델링하였으며 이를 기반으로 자계의 변화를 고려하기 위한 조건부 확률밀도함수를 구하고, 특정한 전류 값을 가질 확률을 나타내는 전류의 확

률분포함수를 구하였다. 또한 자계 확률밀도함수 및 전류 확률밀도함수를 이용하여 최종적으로 누적확률분포를 구하였으며, 철탑으로부터 떨어진 각 지점에서의 자계값은 누적확률분포를 이용하여 각각 50%와 95%로 되는 값을 그 지점에서의 자계값으로 설정하였다. 통계적방법을 이용한 정상상태의 전자계해석에 관한 자세한 내용은 참고문헌¹⁰⁾에 제시되어 있다.

3.2 고장상태

계통에서 임의의 한 요소에 고장이 발생하는 경우에 선로전류 및 모선전압이 변동하게 된다. 전류 및 전압의 변동은 계통전반의 안전도나 양질의 전력공급원칙에 큰 장애가되며 그 심각도에 따라 적절한 대책이 요구된다. 계통에 영향을 미치는 사고에는 여러 가지가 있으나 그중에서 가장 중요하고 빈번하게 발생하는 선로사고에 대하여 발생할 수 있는 문제를 고려한다. 선로사고는 전력계통에 존재하는 송전설비에 전력조류, 즉 송전선로의 전류의 변화 및 전압의 변화를 야기시키며 동시에 2개이상의 선로가 고장나는 다중선로사고와 1개의 선로가 고장나는 단일선로사고로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 단일선로사고에 대한 사례만을 연구하며 이때, 단일선로사고에 대해서는 선로에 과부하조류를 발생시키지 않는 충분한 예비선로가 시설되어 있다고 가정한다. 즉, 계통에서 임의의 선로가 단선되는 경우 계통의 구조는 변하게 되며, 이에 따른 어드미턴스 행렬의 구조는 원래 행렬에서 4개의 요소가 없어지는 형태가 된다. 이러한 경우에 어드미턴스 행렬의 역행렬을 다시 구한다는 것은 계산시간의 낭비를 초래하게 되며 계통상태의 신속한 파악에도 도움이 되지 않게 된다. 따라서 기존의 역행렬로부터 행렬의 조작에 의하여 사고상태의 새로운 역행렬을 구할 수 있다면 상당한 계산시간의 단축이 예상된다. 따라서 계통 전체에 사고를 가상하여 그 사고의 영향을 해석하고 그 대응책을 제시하는 실제의 상정사고해석에 있어서는 초기 조류계산에서 자코비 행렬(Jacobian matrix)의 역행렬이 계산되어 있으므로 이를 이용하여 새로운 자코비 행렬의 역행렬을 쉽게 구할 수 있다. 즉, 조류계산에 있어 역행렬 계산이 전체 조류계산 시간에서 차지하는 비중이 상당히 크므로 수정역행렬정리(modified matrix inverse

lemma)를 이용하게 되면 계산시간이 상당히 줄어들게 된다. 또한, 이를 이용한 조류계산의 결과는 일반적인 분할조류계산(Decoupled Load Flow Method)과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선로사고가 발생한 전력계통의 상태를 해석하기 위하여 조류계산법과 수정역행렬정리를 이용한 프로그램을 사용한다. 전자계를 해석하고자하는 계통의 선로(관심선로) 이외의 선로에서 사고가 발생한 경우, 계통해석을 통하여 정상상태에서의 전류를 기준으로 그 선로에서의 전류 변화비를 구하고, 이를 바탕으로 관심선로의 전류 변화를 산정한다. 또 정상상태에서의 모선전압을 기준으로 관심선로가 연결되어 있는 모선의 전압 변화비를 구하고 그 모선에서의 변동된 전압을 구한다. 이렇게 구한 전압, 전류값을 가지고 전압 및 전류의 변화가 가장 심한 사고의 경우를 선정하여 관심선로에서의 전계 및 자계값을 계산하고 그 결과를 정상상태시 나타나는 전자계 해석 결과와 비교하여 전력계통에서의 고장이 전자계에 미치는 영향을 고찰한다. 자세한 내용은 참고문헌¹¹⁾에 제시되어 있다.

4. 퍼지 언어변수를 이용한 안전성평가

지금까지의 안전기준에 대한 권고안은 기준이 확립적이기 때문에 기준치보다 전계값이 넘어서면 위험하고, 그렇지 않으면 안전하다는 식의 단순한 권고안이다. 그러나 인간이 전자계의 영향을 받는 조건은 어느 한 기준치를 벗어난다고 위험하다 또는 안전하다는 느끼는 것이 아니다. 이와같은 형태의 권고안은 인체 안전기준치로는 다소 불합리한 점이 있으므로 이러한 불합리한 점을 보완하고, 실질적으로 인간이 위험을 느끼는 기준치를 제시하기 위하여, 본 논문에 있어서는 퍼지언어변수를 도입한다. 퍼지 언어변수의 적용에 있어서는 먼저 본 연구에 적합한 퍼지 함수를 생성하고 이 소속함수를 이용하여 인체 안전기준치의 설정이 적합한 것인가를 퍼지 술어, 퍼지 변형자, 퍼지 정성자 등의 용어를 이용하여 나타내었다. 인체안전 기준치로써 지금까지 제시되어 왔던 전자계값의 범위나 시간을 선정하는 확정적인 기준치가 아니라 인간이 실질적이고 감각적으로 느낄 수 있는 기준치가 제시된다.

4.1 퍼지 언어변수

우리가 다루는 많은 변수들 중에는 그 변수의 값으로 숫자를 대응시켜 사용하고 있다. 그러나 이와는 달리 변수의 값으로 숫자가 아니라 자연언어의 단어나 문장이 올 수 있을 때 이 변수를 언어변수라 하고 퍼지 집합을 이용한 언어변수를 퍼지 언어변수라 한다. 이러한 퍼지 언어변수는 일반적으로 $(x, T(x), U, G, M)$ 와 같이 5쌍(quintuple)으로 정의될 수 있다^{6,7)}. 전자계의 인체 안전성 평가에 적용하기 위한 퍼지 언어변수로서 "Field-intensity"를 x 로 정의하여 식(11)로 나타낸다.

$$(Field-intensity, T(Field-intensity), U, G, M) \dots\dots\dots (11)$$

여기서,

Field-intensity : 언어변수 X의 이름

T(Field-intensity) : {safe, very safe, hazardous, very hazardous, very very hazardous}···

U : [0, ∞]

G(Field-intensity) : $T^{i+1} = \{hazardous\} \cup \{very T\}$

M(hazardous) : $\{(u, \mu_{hazardous}(u)) \mid u \in [0, \infty]\}$

4.2 인체 안전평가

(ELF 전계)

본 연구에서는 용어의 집합 T에서 기준으로 하는 용어 hazardous를 기본용어라 정의하였으며, 이 기본용어에 수식어가 붙어서 새로이 만들어진 용어에 대해서도 퍼지 집합을 정의할 수 있다. M(hazardous)은 의미상의 규칙으로서 U상에서 T(x)의 용어를 대응시켜 만들어진 퍼지 집합 'hazardous'의 소속함수 $\mu_{hazardous}(u)$ 를 각국의 인체 안전기준을 고려하여 식(12)와 같은 함수로 만들었다. 여기서 u 값은 전계값을 나타내며 일반적으로 전계값이 20kV/m(각국의 기발표 기준치중 최고치¹²⁾)를 넘어서면 인체에 아주 위험한 것으로 판단하였다.

$$\mu_{hazardous}(u) = \begin{cases} 1 & u \in [20, \infty] \\ \alpha_1 \left[1 + \tanh\left(\frac{\alpha_2 \cdot u - \alpha_3}{\alpha_4}\right) \right] & u \in [0, 20] \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ 는 퍼지 집합의 소속함수를 결정하는 인자로서, 각국에서 제시한 인체안전 기준치를 근거로 인체위험 측면을 고려하여 Fig. 2와 같이 전계값이 20kV/m를 넘어서면 소속함수값이 1이 되고, 20kV/m에 근접한 값들은 상대적으로 높은 값이 되도록 설정하였다. 또한 비교적 낮은 값의 전계값에 대하여는 소속함수 값이 작아지도록 그 인자를 설정하였다. ($\alpha_1=0.5, \alpha_2=1.5, \alpha_3=15.0, \alpha_4=5.0$)

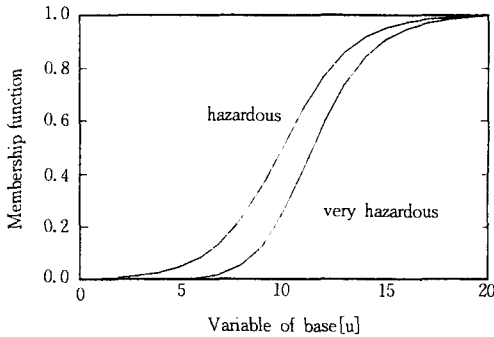


Fig. 2 Membership function for fuzzy variable; hazardous

또한 언어변수 hazardous에 해당하는 퍼지집합이 식(12)와 같이 정의될 때, very false라는 퍼지진리값에 의하여 새로 만들어진 퍼지집합 F의 소속함수는 식(13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mu_F(u) &= (1 - \mu_{true}(u))^2 \\ &= (1 - \mu_{hazardous}(u))^2 \\ &= \begin{cases} 0 & u \in [20, \infty) \\ \left[1 - \alpha_1 \left(1 + \tanh\left(\frac{\alpha_2 \cdot u - \alpha_3}{\alpha_4}\right) \right) \right]^2 & u \in [0, 20] \end{cases} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

그러나 식(12)와 식(13)에 의하여 정해지는 소속함수들은 인자값을 달리 설정함에 따라 변하게 되는 문제점을 보완하기 위하여 소속함수가 퍼지 집합인 개념(type-2 퍼지함수)을 도입한다. 즉, 애매한 상황(ambiguity)의 소속정도를 나타내기 위하여 소속함수에 $\pm \delta$ 를 식(12)에 적용시키면 기존의 소속함수에 대하여 Fig. 3과 같이 $\pm \delta$ 만큼의 퍼지성을 갖는 새로운 소속함수가 만들어진다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 전계가 u_0 인 경우 소속함수 $\mu_{hazardous}(u_0)$ 는 $\mu_{hazardous}(u_0) - \delta \leq \mu_{hazardous}(u_0) \leq \mu_{hazardous}(u_0) + \delta$ 가 된다. 여기서 μ

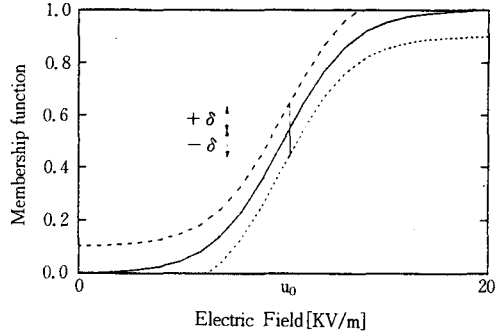


Fig. 3 New membership function with fuzziness, $\pm \delta$

$\mu_{hazardous}(u_0)$ 일 소속함수 값은 1로 주어지고, 그 이외의 값에 대한 소속함수 값 μ_δ 는 식(14)와 같이 주어진다.

$$\mu_\delta = 1 - \frac{1}{\delta} D \quad (0 \leq D \leq \delta) \quad \dots\dots\dots (14)$$

(ELF 자계)

ELF 자계에 의한 안전평가를 위해 ELF 전계의 경우와 같은 개념을 도입하여 u가 자계를 나타낼 때 소속함수 $\mu_{hazardous}(u)$ 는 식(15)와 같이 표현하였으며, 자계값이 10G를 넘어서면 인체에 아주 위험하다는 기준을 인용하였다.

$$\begin{aligned} \mu_{hazardous}(u) &= \begin{cases} 1 & u \in [10, \infty) \\ \beta_1 \left[1 + \tanh\left(\frac{\beta_2 \cdot u - \beta_3}{\beta_4}\right) \right] & u \in [0, 10] \end{cases} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

5. 사례 연구

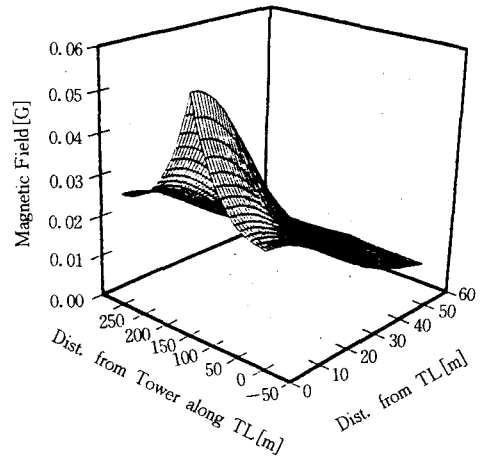
본 연구에서 제시한 전계해석 및 퍼지언어변수를 이용한 인체 안전평가 방법의 효용성 및 적용 가능성을 검증하기 위하여 개발된 프로그램을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구 대상계통으로는 765kV 송전선으로 가설되어 있다고 가정한 수정 IEEE 14모선 계통을 선정하였다. 계통의 상태를 해석하기 위한 선로 및 모선의 자료들은 생략하였으며 계통도 및 765kV 송전철탑 자료는 참고문헌¹¹⁾에 제시되어 있다.

5.1 정상상태

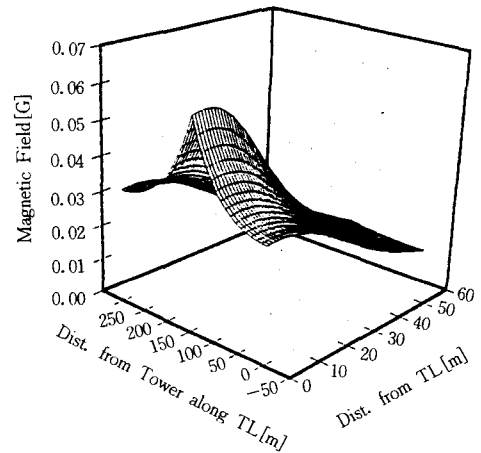
철탑의 경간을 300m인 765kV 역상배열 및 정상배열일 때 송전선 부근에서의 전계 및 자계의 확률적 값을 구하기 위하여 철탑으로부터 1m 떨어진 지점에서의 자계 누적확률분포를 이용하여 구하였다. Fig. 4(a), (b)는 765kV 역상 및 정상 2회선에 대하여 누적확률분포에서 95%를 나타내는 값을 이용하여 구한 자계의 확률적 계산치이며, Fig. 5(a), (b)는 765kV 역상 및 정상 2회선에 대한 전계를 나타낸다. 또, 일일부하 변동에 따른 전계 및 자계의 변화를 구하기 위하여 기저부하 12시간, 경부하 6시간, 중부하 6시간으로 분할 설정한 경우의 결과는 Fig. 6(a), (b)에 제시되어 있다. 사례연구 결과 Fig. 4(a), (b)와 같이 765kV 송전선에 있어서 역상배열에 대한 자계 값은 0m 지점에서 0.0059G, 정상배열에 있어서는 4m 지점에서 0.06G를 각각 나타내고 있다. Fig. 5(a), (b)와 같이 전계값에 있어서는 역상배열의 경우 13m에서 4.1675kV/m, 정상배열의 경우 11m에서 4.7066kV/m를 나타내고 있다. 따라서 정상배열이 역상배열에 비하여 다소 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 부하수준에 따른 전류와 전압의 변화는 기저부하를 기준으로 할 경우, 경부하시 전류변동을 52.2%, 전압변동을 1%로 각각 나타냈고, 중부하시의 전류변동률은 155.6%로 나타났으나 전압변동률은 경부하시와 마찬가지로 1% 이하로 나타났다. 이와 같은 변화율을 이용하여 관심 선로인 7번 선로의 전압 및 전류값의 변화를 살펴보면, 기저부하시 전압, 전류를 765kV, 1000A 기준으로 할 경우, 경부하시 772kV, 522A로 변하며, 중부하시 756kV, 1556A로 변하게 된다. 따라서 시간대별 부하변동에 따른 전계강도의 변화는 Fig. 6(a)와 같이 거의 변화가 없으나 자계강도에 있어서는 경부하, 중부하시 Fig. 6(b)와 같이 각각 다르게 되며 그 차이 또한 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 중부하시 최대 자계강도는 철탑으로부터 4m 떨어진 지점에서 0.0493G를 나타내고, 경부하시는 0.0172G로 중부하시의 자계 값과 비교하면 2.867배 정도 차이가 남을 알 수 있다.

5.2 고장상태

계통에서 임의의 선로에 고장이 발생한 경우, 선로전류 및 모선전압의 변동이 심각하게 나타나므로 각 선로 및 모선에서의 전류·전압변동률을



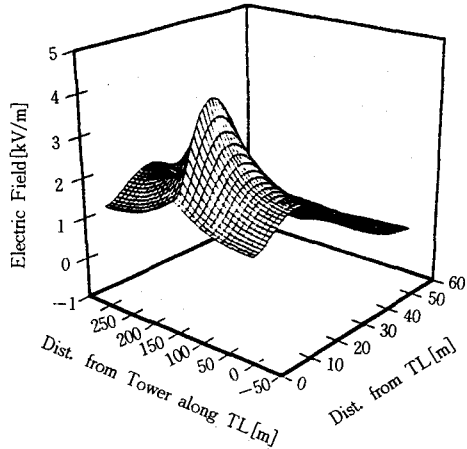
(a) Inverse array



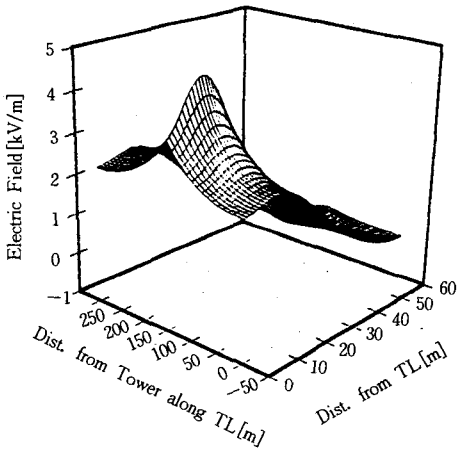
(b) Sequence array

Fig. 4 Probabilistic calculation of magnetic field under the 765kV inverse and sequence transmission line

구하여 765kV 3상 2회선에 대한 사례연구를 수행하였다. 관심선로는 7번선로로 선정하였다. Fig. 7(a)에는 전압의 변화가 가장 심한 사고의 경우를 선택하여 전계결과치를 제시하였으며, 전류의 변동이 가장 심각한 사례를 선정하여 자계계산 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 1번 선로의 고장시 관심선로 7번에 흐르는 전류는 정상상태의 배가 조금 넘는 2,070A가 흐르는 것으로 계산되었고, 13번 선로가 고장났을 경우의 전압은 787kV를 나타내고 있어서 전압의 변동이 거의 없음을 보여 주고



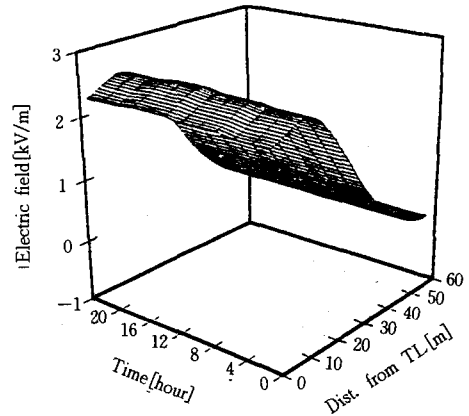
(a) Inverse array



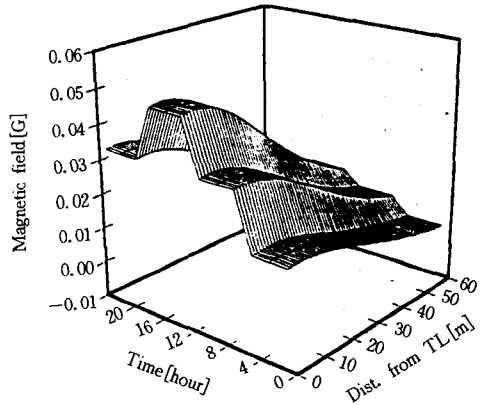
(b) Sequence array

Fig. 5 Electric field intensity under the 765kV inverse and sequence transmission line

있다. 선로사고시 전계강도는 11m 지점에서 4.7066kV/m, 자계강도는 5m 지점에서 0.1223G를 나타내고 있다. 이는 정상상태의 전계강도값 4.1675kV/m보다 1.13배 높은 수치이며, 자계강도값 0.0559G보다 2.19배 높은 수치이다. 이 경우 퍼지언어변수를 이용한 안전성을 평가하면, 전계 값의 최고치인 4.7066kV/m에 대하여 “4.7066kV/m is hazardous”와 같은 명제인 경우, 소속함수 값 $\mu_{\text{hazardous}}(4.7066) = 0.04$ 가 되고, $\mu_{\text{very hazardous}}(4.7066) = 0.0016$ 을 나타내고 있다. 이 값을 퍼지정성자를 이용한 “4.7066kV/m is hazardous is very



(a) Electric field



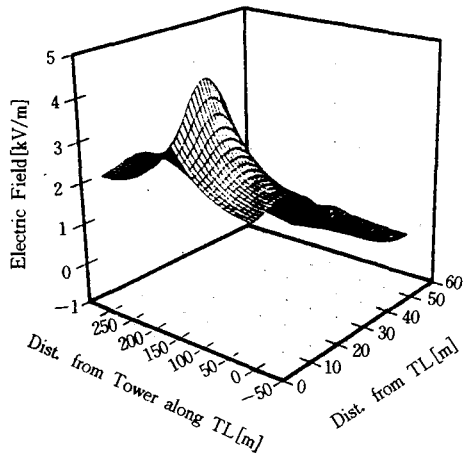
(b) Magnetic field

Fig. 6 Electric and magnetic field intensity according to load level in the model system

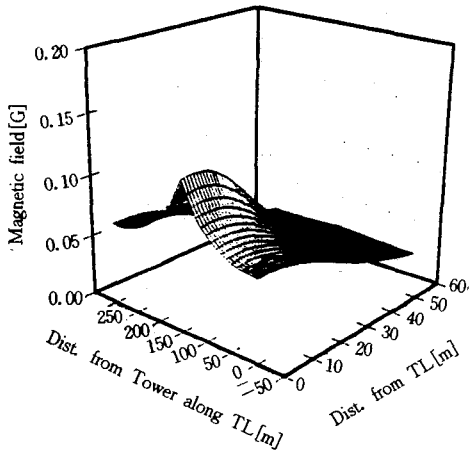
false”라는 명제로 그 진리값을 평가할 경우, 0.9216의 진리값을 나타내고 있다. 따라서 4.7066kV/m에 대하여는 위험도가 비교적 낮게 평가되나 이는 소속함수를 결정할 때 너무 높은 값의 전계 위험성 한계치가 반영되었기 때문이다.

6. 결 론

본 논문은 계통상태를 고려한 ELF 전자기해석을 준정전계법을 이용하였으며 인체 안전성을 퍼지언어변수를 이용하여 평가하였다. 계통의 상태를 정상상태와 고장상태로 구분하였으며, 정상상태에서의 전류의 확률분포를 얻기위한 해석법으로



(a) Electric field



(b) Magnetic field

Fig. 7 Electric and magnetic field intensity of the severest case in 765kV

Monte Carlo Simulation 방법을 이용하였고, 고장 상태에서의 해석은 상정사고해석 방법을 도입하였다. 사례연구를 통하여 제안한 방법론의 타당성과 효율성을 검토하였으며, 본 연구의 주요 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 독립 송전선로에 의한 기존의 전자계 해석방법을 탈피하여 송전선로를 전력계통의 한 요소로 고려함으로써 계통의 불확실한 변동을 모델링할 수 있는 새로운 방법론을 제시하였다.
- 2) 인체 안전평가를 퍼지 언어변수(Fuzzy Linguistic Variable)를 이용하여 수행함으로써 보통

집합(Crisp Set)의 개념에 입각한 안전기준치가 제공하는 ‘안전’ 또는 ‘위험’이라는 이진값의 단점을 어느 정도 보완할 수 있다.

이 논문은 1995년 충북대학교 학술연구재단 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) D.W. Zipse, "Health Effects of Extremely Low-Frequency(50-60Hz) Electric and Magnetic Fields" IEEE Trans. Indus. App., Vol. 29, No. 2, March/April 1993.
- 2) 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.
- 3) 대한전기협회, "초고압 계통에서 전자계의 인체에 미치는 영향", 1981.
- 4) 한국전기연구소, "전자계의 생물학적 영향에 관한 연구", May, 1987.
- 5) K. T. Khu, M. G. Lauly, D. W. Bowen, "A fast linearization method to evaluate the effect of circuit contingencies upon system load bus voltage", IEEE Trans. on Vol. PAS-101, No. 10, October, 1982.
- 6) 이광형, 오길록, 퍼지이론 및 응용, 흥통출판사, 1991.
- 7) H. J. Zimmermam, "Fuzzy set theory and its applications, KluwerNijhoff Publishing : Hingnam, MA, p. 363, 1985.
- 8) J. F. Baldwin "A new approach to approximation reasoning using a Fuzzy logic", Fuzzy sets and systems 2, pp. 309~325, 1979.
- 9) 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, October, 1992.
- 10) 김상철, 김두현, "통계적방법을 이용한 초고압 송전선의 전자계 특성 및 인체 안전에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 75~80, 1996.

- 11) 김상철, 김두현, “계통상태를 고려한 송전선의 ELF전자계”, 한국산업안전학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 75~80, 1996.
- 12) WHO, “Environmental health criteria 35”, 1984.