

부하의 전압특성을 고려한 3상 2회선 불평형 송전선로에서의 전자계에 대한 퍼지척도 가능성평가

송현선 · 김상철*[†]

세명대학교 전기공학과 · *세명대학교 안전공학과
(2001. 3. 16. 접수 / 2001. 8. 27. 채택)

Assessment of Fuzzy Measure Possibility for the Electromagnetic Field of unbalanced two coupled Three-phase Transmission line Considering Load-Voltage Characteristics

Hyun-Seon Song · Sang-Chul Kim*[†]

Department of Electric Engineering, Semyung University · *Department of Safety Engineering, Semyung University
(Received March 16, 2001 / Accepted August 27, 2001)

Abstract : This paper presents a study on the assessment of fuzzy measure possibility for the electromagnetic field of unbalanced system. It takes into account an untransposed transmission line and unbalanced load. A three phase load flow program was developed which employs a Newton-Raphson method as a tool to analyze system unbalanced. This research presents a method of handling two coupled three phase transmission system unbalance analysis and unbalanced power demand as a function of voltages. In assessment of fuzzy measure possibility for the electromagnetic field, this paper use probability of fuzzy and measure of fuzziness technique.

Key Words : fuzzy measure possibility, unbalanced system, Newton-Raphson method, fuzziness

1. 서 론

최근 전력수요의 증가 추세에 따라 전력시스템의 규모도 커지고 송전전압도 점점 높아져서 345[kV]가 주 공급전압으로 자리매김을 하고 있다. 송전전압이 높아질수록 송전용량은 증가되고 송전손실은 줄일 수 있는 장점이 있지만 절연, 정전유도 및 아크지락에 의한 이상전압 발생 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 우리나라에서는 변압기의 중성점을 직접 접지하고 있다. 그러나 직접접지방식은 평상시에도 불평형전류 및 제3고조파로 인한 유도장해의 발생위험이 있으며 그 정도는 지락고장의 경우 더욱 심각하게 나타난다. 특히 극초고압 송전선로는 자연상태로 노출되어 가설됨에 따라 하절기 7~8월에 집중된 태풍의 영향으로 1선

지락고장은 전체 시스템 고장의 70~80%를 차지하고 있다. 이와 같이 지락고장은 정전상태를 야기할 뿐만 아니라 통신선에 전자유도장해를 일으키고 대지로 흐르는 영상분전류에 의하여 인근 사람, 동물들이 감전사고를 당하기도 한다. 이러한 사고는 고속도차단 방식을 채용함으로써 그 피해를 최소화하고 있으나 재폐로 실패시는 고장회선만을 차단하고 나머지 건전회선으로 송전을 계속하는 경우도 있다.¹⁾ 이와 같은 시스템의 불평형 운영과 송전선로의 고장시에는 선로의 전압 전류도 평상시 평형계통보다 크게 되어 안전사고의 발생확률도 높으므로 비정상시의 전자계를 파악하고 인체에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.²⁾

각 상별 부하의 불평형상태뿐만 아니라 2회선 송전계통에서 고장회선을 제거한 1회선으로 송전하는 비정상시의 선로 불평형 계통에서의 전압·전류는 3상조류계산으로 파악할 수 있다.^{3,4)}

[†]To whom correspondence should be addressed.
sckim@venus.semyung.ac.kr

본 연구에서 2회선 선로로 구성된 불평형 계통의 3상조류계산은 V_{Bus} 행렬에 의한 뉴턴-랩슨법을 적용하여 해석하였다. 선로의 어드미턴스는 한모선에 대하여 6×6행렬로 구성하였다. 이를 위하여 먼저 2회선 각 선간의 상호결합 관계는 직렬 임피던스로, 각 선과 대지간의 결합관계는 병렬커패시턴스로 표현한 다음 축약기법(Reduction technique)에 의하여 가공지선의 영향을 고려하였다.⁴⁾ 또한 종래의 3상 조류계산에서 부하의 전압과 주파수의 변동에 무관하게 일정한 것으로 가정하였으나, 실제로는 부하의 증감에 따라 모선전압이 변화되고 이 전압 변화는 다시 부하를 변화시키는 부하의 자기제어특성이 있으므로 본 논문에서는 부하를 전압의 4차 함수로 표현하여 부하의 전압특성을 고려할 수 있도록 하였다.⁵⁾

불평형 3상 조류계산법에서는 경제적인 기억용량과 계산을 단축하기 위하여 Sparsity기법과 삼각 인수화기법을 적용하였으며 24모선 불평형 3상 전력계통에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.⁶⁾ 퍼지 척도 가능성 평가에서는 불평형 정도가 심각한 경우에 대하여 3상조류계산의 시뮬레이션에 의하여 구한 최대 전압, 전류값으로부터 전자계값을 도출하였으며, 이 도출된 전자계값을 하나의 퍼지사건이라 정하고 퍼지확률에 따른 α -수준사건을 구하였다. 이러한 방법으로 얻어진 α -수준사건의 불확실정도를 측정하기 위하여 퍼지정도의 척도를 이용하여 정규화된 척도를 구하였다.

2. 불평형 3상2회선 전력시스템의 모델링

송전선, 부하, 변압기 및 발전기로 구성된 불평형 전력시스템에서 변압기와 발전기는 3상 1회선 송전 시스템과 동일함으로 본 논문에서는 송전선로에 대하여 직렬임피던스와 병렬커패시턴스로 모델링하고 이를 등가 π 형 회로로 나타낸다. 부하모형에서는 부하의 전압특성을 고려하기 위하여 전압의 4차 함수로 표현하였다.

2.1. 송전선 모델링

2.1.1. 직렬 임피던스

가공지선 g와 중성선을 포함한 3상 2회선의 a상의 1회선 a1에 대한 상호결합관계는 그림 1과 같이 되고 이로부터 a1상의 전압·전류관계는

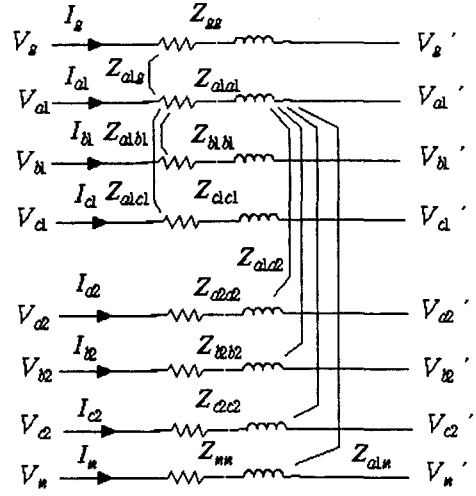


Fig. 1. Series impedance of a three phase 2 circuits

$$\begin{aligned} \Delta V_{a1} = V_{a1} - V'_{a1} = & Z_{a1a1}I_{a1} + Z_{a1b1}I_{b1} + Z_{a1c1}I_{c1} \\ & + Z_{a1a2}I_{a2} + Z_{a1b2}I_{b2} + Z_{a1c2}I_{c2} + Z_{a1g}I_g \\ & + Z_{a1n}I_n \end{aligned} \quad (1)$$

가공지선 g와 중성선 n의 전압·전류 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta V_g = V_g - V'_g = & Z_{gg}I_g + Z_{ga1}I_{a1} + Z_{gb1}I_{b1} \\ & + Z_{gc1}I_{c1} + Z_{ga2}I_{a2} + Z_{gb2}I_{b2} + Z_{gc2}I_{c2} + Z_{gn}I_n \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_n = V_n - V'_n = & Z_{nn}I_n + Z_{na1}I_{a1} + Z_{nb1}I_{b1} \\ & + Z_{nc1}I_{c1} + Z_{na2}I_{a2} + Z_{nb2}I_{b2} + Z_{nc2}I_{c2} + Z_{ng}I_g \end{aligned} \quad (3)$$

식(1), (2), (3)으로부터 가공지선, 중성선 및 3상2회선 송전선로의 전압·전류관계식을 임피던스 행렬로 블록화 하여 간결하게 표현하면 식(4)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{abc1} \\ \Delta V_{abc2} \\ \Delta V_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B & Z_C \\ Z_D & Z_E & Z_F \\ Z_G & Z_H & Z_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc1} \\ I_{abc2} \\ I_{gn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에서 가공지선과 접지선 전압은 0이므로

$$\Delta V_{abc1} = Z_A I_{abc1} + Z_B I_{abc2} + Z_C I_{gn} \quad (5)$$

$$\Delta V_{abc2} = Z_D I_{abc1} + Z_E I_{abc2} + Z_F I_{gn} \quad (6)$$

$$0 = Z_C I_{abc1} + Z_H I_{abc2} + Z_I I_{gn} \quad (7)$$

식(7)에서 I_{gn} 을 구하면

$$I_{gn} = -Z_I^{-1} Z_C I_{abc1} - Z_I^{-1} Z_H I_{abc2} \quad (8)$$

3상 2회선에 가공지선 및 접지선의 결합관계를 고려하기 위하여 식(8)을 식(5), (6)에 대입하면

$$\Delta V_{abc1} = (Z_A - Z_C Z_I^{-1} Z_G) I_{abc1} + (Z_B - Z_C Z_I^{-1} Z_H) I_{abc2} \quad (9)$$

$$\Delta V_{abc2} = (Z_D - Z_F Z_I^{-1} Z_G) I_{abc1} + (Z_E - Z_F Z_I^{-1} Z_H) I_{abc2} \quad (10)$$

식(9), (10)에서 3상 2회선의 전류를 구하고

$$\begin{bmatrix} I_{abc1} \\ I_{abc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A - Z_C Z_I^{-1} Z_G & Z_B - Z_C Z_I^{-1} Z_H \\ Z_D - Z_F Z_I^{-1} Z_G & Z_E - Z_F Z_I^{-1} Z_H \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_{abc1} \\ \Delta V_{abc2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이를 3상 2회선으로 전개하면 어드미턴스는 식(12)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{a1} \\ \Delta V_{b1} \\ \Delta V_{c1} \\ \Delta V_{a2} \\ \Delta V_{b2} \\ \Delta V_{c2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(12)에서 2회선을 1회선으로 등가화한 전류 I_{abc} 는 각 회선의 전류 I_{abc1} 과 I_{abc2} 를 합하면 된다. 즉 $I_a = I_{a1} + I_{a2}$, $I_b = I_{b1} + I_{b2}$, $I_c = I_{c1} + I_{c2}$ 이고 각 회선별 전압은 $\Delta V_a = \Delta V_{a1} = \Delta V_{a2}$, $\Delta V_b = \Delta V_{b1} = \Delta V_{b2}$, $\Delta V_c = \Delta V_{c1} = \Delta V_{c2}$ 이므로 식(12)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_{41} & Y_{12} + Y_{42} & Y_{13} + Y_{43} & Y_{14} + Y_{44} & Y_{15} + Y_{45} & Y_{16} + Y_{46} \\ Y_{21} + Y_{51} & Y_{22} + Y_{52} & Y_{23} + Y_{53} & Y_{24} + Y_{54} & Y_{25} + Y_{55} & Y_{26} + Y_{56} \\ Y_{31} + Y_{61} & Y_{32} + Y_{62} & Y_{33} + Y_{63} & Y_{34} + Y_{64} & Y_{35} + Y_{65} & Y_{36} + Y_{66} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)에서 ΔV_{abc2} 에 대응하는 전압 $\Delta V_a, \Delta V_b, \Delta V_c$ 를 0으로 두고 어드미턴스 행렬을 4개의 block으로 나누어 간결하게 표현하면

$$\begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{abc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(14)에서 a, b, c상 등가전류 I_{abc} 와 각 회선별 전류 I_{abc1} , I_{abc2} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{abc} &= Y_1 \Delta V_{abc} \\ I_{abc2} &= Y_3 \Delta V_{abc} \\ I_{abc1} &= I_{abc} - I_{abc2} \end{aligned} \quad (15)$$

그러므로 송전선의 어드미턴스 행렬은 Y_1 과 Y_3 만 소요된다.

2.2.2. 병렬 커패시턴스

가공지선과 중선선을 포함한 3상 2회선에서 a_1 송전선의 커패시턴스 관계를 나타낸 그림 2에서 각 상전압을 전하와 전위계수 관계로 block화 하여 간결하게 표현하면 식(16)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{abc1} \\ V_{abc2} \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_A & P_B & P_C \\ P_D & P_E & P_F \\ P_G & P_H & P_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{abc1} \\ Q_{abc2} \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (16)$$

식(16)에서 가공지선의 전압 $V_g=0$ 이므로 축약기법(reduction technique)을 적용하여 가공지선의 영향을 제거하면

$$V_{abc1} = (P_A - P_C P_I^{-1} P_G) Q_{abc1} + (P_B - P_C P_I^{-1} P_H) Q_{abc2} \quad (17)$$

$$V_{abc2} = (P_D - P_F P_I^{-1} P_G) Q_{abc1} + (P_E - P_F P_I^{-1} P_H) Q_{abc2} \quad (18)$$

식(17), (18)에서 3상 2회선의 전하를 구하면

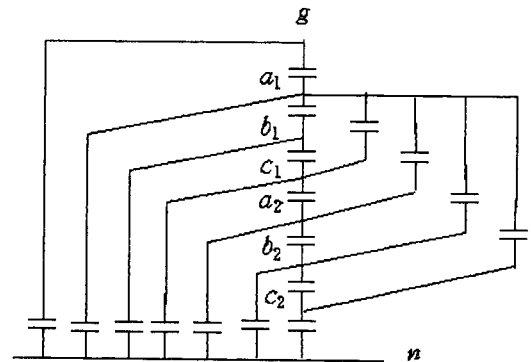


Fig. 2. shunt admittance of a three - phase 2 circuits

$$\begin{bmatrix} Q_{abc1} \\ Q_{abc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_A - P_C P_I^{-1} P_G & P_B - P_C P_I^{-1} P_H \\ P_D - P_F P_I^{-1} P_G & P_E - P_F P_I^{-1} P_H \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{abc1} \\ V_{abc2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

이를 3상 2회선으로 전개하면 커패시턴스는 식(20)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} Q_{a1} \\ Q_{b1} \\ Q_{c1} \\ Q_{a2} \\ Q_{b2} \\ Q_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \\ V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

식(20)에서 각 회선별 전압, 전류 관계로부터 2회선을 1회선으로 등가화하고 식(21)의 커패시턴스 행렬을 4개의 block으로 나누어 간결하게 표현하면

$$\begin{bmatrix} Q_{abc} \\ Q_{abc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

식(21)에서 a, b, c상 등가전류 I_{abc} 와 각 회선별 전류 I_{abc1} , I_{abc2} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{abc} &= j\omega C_1 V_{abc} \\ I_{abc2} &= j\omega C_3 V_{abc} \\ I_{abc1} &= I_{abc} - I_{abc2} \end{aligned} \quad (22)$$

2.2. 부하모형

부하모형에는 단일집단부하의 특성을 시험에 의해 얻는 시험법과 개별부하의 특성을 시험하고 이의 구성비를 적용하여 부하특성을 얻는 개별부하 조합법이 있는데 송전선로의 부하는 비교적 대용량의 유도전동기가 부하의 40~70%정도를 차지하고 있다. 유도전동기의 부하모형을 도출하는 데는 개별적인 특성을 일일이 취급할 수 없으므로 EPRI 보고서(RP894-3, 1978)의 부하모형을 근간으로 표 1에서 분류한 용량별 대표 특성정수를 사용하였으며, 전체의 유도전동기에 대한 부하특성을 고려하여 전압변화에 대하여 4차식 모형으로 표현하였다.⁵⁾

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 (a_p + b_p \Delta V + c_p \Delta V^2 + d_p \Delta V^3 + e_p \Delta V^4) \\ Q_1 &= R Q_0 \end{aligned} \quad (23)$$

단, P_0, Q_0 : 기본전압에서의 유효·무효전력
 P_1, Q_1 : 실제전압에서의 유효·무효전력
 R : 유효·무효전력간의 비

Table 1. Load Model of Induction Motor

계수 부하	a_p a_q	b_p b_q	c_p c_q	d_p d_q	e_p e_q
10[KW] 미만	1.000 0.533	0.088 1.336	0.351 5.210	0.0 0.234	0.0 0.0
10~100[KW]	1.000 0.533	0.060 1.336	0.200 5.210	0.0 0.234	0.0 0.0
100~1000[W]	1.000 0.533	0.030 1.336	0.200 5.210	0.0 0.0	0.0 0.0
1000[W] 이상	1.000 0.533	0.020 1.336	0.200 5.210	0.0 0.0	0.0 0.0

3. 뉴턴-랩슨 전력조류계산

뉴턴-랩슨법에 의한 3상 전력조류계산은 모션전압[V]과 전압의 위상각[θ]을 변수로 하여 비선형으로 표현된 전력편차 방정식을 테일러 급수전개식에 반복적용하여 해를 구하는 것이다.

전력편차 방정식은 발생된 유효·무효전력(P_i^{SP}, Q_i^{SP}), 소비되는 부하의 유효·무효분(P_D^{SP}, Q_D^{SP}) 및 다른 모션으로 송전되는 전력의 합으로 표현된다. 모션 i에 대한 P상의 유효 및 무효전력 편차방정식은

$$\begin{aligned} \Delta P_i^p &= P_{G,i}^{SP} - P_{D,i}^{SP} \\ &\quad - V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i^p &= Q_{G,i}^{SP} - Q_{D,i}^{SP} \\ &\quad - V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서

V_i^p, V_k^m : 모션 i의 P상과 모션 k의 m상의 전압크기
 $\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m$: 모션 i의 p상 위상과 모션 k의 m상 위상과의 차
 G_{ik}^{pm}, B_{ik}^{pm} : 모션 i의 p상 위상과 모션 k의 m상에 관련된 어드미턴스행렬의 실수부와 허수부

식(24), (25)의 전력편차방정식을 상태변수 V, θ에 대하여 테일러 급수전개하고 1차항만 고려하면

$$\Delta P_i^p = \frac{\partial \Delta P_i^p}{\partial \theta_k^m} \Delta \theta_k^m + \frac{\partial \Delta P_i^p}{\partial V_k^m} \Delta V_k^m \quad (26)$$

$$\Delta Q_i^p = \frac{\partial \Delta Q_i^p}{\partial \theta_k^p} \Delta \theta_k^p + \frac{\partial \Delta Q_i^p}{\partial V_k^p} \Delta V_k^p \quad (27)$$

식(24), (25) 및 식(26), (27)로부터 Jacobian 행렬을 유도하고 뉴턴-랩슨법에 의한 k번째 반복식으로 표현하면 다음과 같이 된다

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{k-1} \\ \Delta Q^{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{k-1} & N^{k-1} \\ M^{k-1} & L^{k-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} \quad (28)$$

식(28)에서 Jacobian행렬을 [L] [U]로 삼각인수화(triangular factorized)하여 전진 및 후진대입법에 의하여 해를 구함으로써 계산기용량과 계산시간을 단축시킬 수 있다.⁶⁾

4. 퍼지 확률 및 퍼지 척도

4.1. 퍼지 확률(Fuzzy probability)

불평형 정도가 심각한 경우에 대하여 3상 조류계산에서 구한 최대 전압·전류데이터를 이용하여 전계값을 구한 후 이것에 대한 소속함수를 hazardous 라 정하고 이 사건을 퍼지사건이라고 정의하면 이때 이 퍼지사건은 표본공간내에 식(29)와 같이 주어진다.

$$hazardous = \{(x, \mu_{hazardous}(x) \mid x \in S) \quad (29)$$

여기서 x : electric field- value

이 사건 hazardous의 α -수준사건은 식(30)과 같이 보통집합으로 나타낼 수 있다.

$$hazardous_\alpha = \{(x \mid \mu_{hazardous}(x) \geq \alpha) \quad (30)$$

이때 $hazardous_\alpha$ 는 상호배타적이고 $hazardous_\alpha$ 의 확률은 각 사건의 확률을 합한 것이다. 이럴 경우 α -수준사건의 확률은 '퍼지사건 hazardous의 확률이 P($hazardous_\alpha$)일 가능성이 α 이다'로 나타낼 수 있다. α 의 변화에 따라서 퍼지사건의 확률 P($hazardous$)는 여러 경우가 생기게 되며 식(31)과 같이 표현된다.⁸⁾

$$P(hazardous) = \{(P(hazardous_\alpha), \alpha) \mid \alpha \in [0, 1]\} \quad (31)$$

식(31)의 α -수준사건들의 확률은 식(32)와 같이 된다.

$$P(\mu_{hazardous} \alpha_i) = \sum_{i=1}^n P_n(\text{Electric field value}) \quad (32)$$

4.2. 퍼지 정도의 척도(Measure of fuzziness)

퍼지집합으로 나타난 불확실성의 정도를 퍼지 정도라 하고 이 퍼지 정도를 측정하는 함수를 퍼지 정도 척도라 한다. 가능성 척도로 가장 많이 이용되고 있는 Shannon 엔트로피는 모든 원소의 확률합도 1이 되어야 하는 제약이 있으므로 본 논문에서는 이런 제약이 불필요한 퍼지집합을 이용하였으며, 퍼지 집합 μ_A 의 퍼지 정도를 측정할 수 있는 척도 $f(\mu_A)$ 를 식(33)과 같이 정리하였다.

$$f(hazardous) = \sum_{x \in X} [\mu_{hazardous}(x) \log_2 \mu_{hazardous}(x) + \{1 - \mu_{hazardous}(x)\} \log_2 \{1 - \mu_{hazardous}(x)\}] \quad (33)$$

5. 사례 연구

본 논문에서 제시한 2회선 불평형 송전선로의 3상 조류계산 및 퍼지언어변수를 이용한 인체안전평가방법의 효용성 및 적용가능성을 검증하기 위하여 24모선 345[kV]모델 계통을 이용하였다.²⁾

이 계통을 이용하여 개발한 프로그램으로 2회선 송전선로의 불평형 상태를 고려하여 모선의 전압 및 선로에 흐르는 전류값을 계산하였으며, 불평형계통에 있어서의 전자계 해석⁹⁾은 참고문헌에 제시되어 있는 철탑제원 자료를 이용하였다.²⁾

5.1. 3상 전력조류계산

2회선 모델 계통에서 선로평형, 불평형 및 부하평형·불평형에 따라 4가지 경우로 나누어 3상전력조류계산한 결과 모선전압, 영상분(m_0),역상분(m_2) 불평형률, 선로전류 및 전력조류를 표 2에 나타내었다. 관심 선로는 흐르는 전류가 가장 많은 17번 모선에서 9번 모선의 선로를 택하였다.

[case 1] 선로정수 뿐만 아니라 부하도 A,B,C 상에 균등하게 분포된 평형상태로서 영상분 및 역상분 불평형률이 모두 0이다. 17번 모선전압의 크기는 각 상 모두 351.21[kV]이고 위상각은 각 상별로 120°의 차를 보이고 있다. 선로를 통하여 흐르는 전류와 유효·무효전력으로 각 상별 모두 동일하게 각각 2304.878 [A], 463.309[MW], 61.521[MVar]로 나타났다.

CASE 1 : 2회선 선로평형, 부하평형

[CASE 2,3] CASE 2는 그 선로의 불충분한 연가 로 선로와 1번 모선의 부하가 A, B, C상 별로 230.

Table 2. The results of 3 phase power flow for 2 circuits T/L

CASE		1		2		3		4	
		V	θ	V	θ	V	θ	V	θ
V_{L17} [KV]	A	351.210	24.8°	351.210	24.9°	350.520	24.9°	351.211	25.2°
	B	351.210	-95.2°	351.555	-95.2°	351.555	-95.2°	352.935	-95.3°
	C	351.210	144.8°	350.520	144.7°	350.950	144.7°	349.795	144.4°
M0		0.0		0.040		0.026		0.209	
M2		0.0		0.149		0.190		0.724	
I_{L17-9}	A	2304.878		2289.669		2126.295		2084.680	
	B	2304.878		2301.336		2268.903		2245.342	
	C	2304.878		2319.722		2289.796		2362.090	
S_{17-9} P+jQ[MW]	A	463.309+j61.521		460.487+j59.311		426.164+j59.638		419.14+j54.952	
	B	463.309+j61.521		463.294+j59.538		458.147+j46.728		455.411+j44.075	
	C	463.309+j61.521		465.095+j63.895		458.437+j71.454		470.005+j81.701	

*CASE 1 : 2회선 선로평형, 부하평형 CASE 2 : 2회선 선로불평형, 부하불평형 (1모선 : 230, 240, 280)
CASE 3 : 2회선 선로불평형, 부하평형, 5-9 선로 1회선 개방 CASE 4 : 2회선 선로불평형, 부하불평형 (1모선 : 230, 240, 280), 5-9 선로 1회선 개방

240. 280[MW]으로 불평형인 경우로서 전압의 영상분 및 역상분 불평형률이 0.04[%] 및 0.149[%]로 나타났으며 선로에 흐르는 전류로 A,B,C상 별로 2289.669, 23014.336, 2319.722[MW]로서 최대 편차가 30.053[A]로 나타났다.

CASE 3은 선로 불평형, 부하는 평형상태이고 선로 5-9의 2회선 중 1회선이 개방된 상태로 조류계산한 결과로 영상분 및 역상분 불평형률이 각각 0.026[%], 0.19[%]로서 CASE1,2에 비하여 모두 심각하게 나타났다.

[CASE 4] CASE 4는 선로불평형, 부하불평형 및 선로 5-9의 2회선 중 1회선이 개방된 상태의 조류계산 결과로 CASE 1, 2, 3보다 전압의 불평형률, 특히 역상분 불평형률이 0.724[%]로서 심각하게 나타났다. 또한 17-9번 선로 각 상별 전류가 각각 2084.680, 2245.342, 2362.09[A]로서 최대 편차가 227.41[A]로서 불평형 정도가 심각하였다.

5.2. 인체위험 가능성 평가

표 2에서 주어진 case 4의 최대 전압·전류데이터를 이용하여 전계값을 표 3과 같이 도출하였으며,

표 3을 이용하여 피지확률을 구하기 위한 표본공간을 그림으로 나타내면 그림 3과 같다.

피지사건은 참고문헌⁷⁾에서 제시한 전계값 피지소속함수의 변수인 hazardous의 값을 본 논문의 피지사건으로 할 경우 이것을 집합으로 나타내면 다음과 같다.

Table 3. The result of electromagnetic value

철탑으로부터 거리[m]	전계값 [kV/m]	자계값 [G]	철담으로부터 거리[m]	전계값 [kV/m]	자계값 [G]
0	2.8936	.2187	31	.6781	.0325
1	3.5027	.2191	32	.6551	.0304
2	4.6244	.2228	33	.6326	.0284
3	6.0312	.2297	34	.6107	.0267
4	7.5833	.2386	35	.5894	.0251
5	9.1075	.2480	36	.5687	.0236
6	10.3359	.2550	37	.5487	.0223
7	10.9540	.2567	38	.5294	.0210
8	10.7654	.2512	39	.5107	.0199
9	9.8376	.2386	40	.4927	.0188
10	8.4578	.2212	41	.4753	.0179
11	6.9497	.2016	42	.4586	.0170
12	5.5411	.1819	43	.4426	.0161
13	4.3417	.1633	44	.4272	.0154
14	3.3794	.1464	45	.4124	.0146
15	2.6391	.1313	46	.3982	.0140
16	2.0887	.1180	47	.3846	.0133
17	1.6919	.1062	48	.3715	.0128
18	1.4141	.0959	49	.3590	.0122
19	1.2243	.0869	50	.3471	.0117
20	1.0959	.0789	51	.3356	.0112
21	1.0084	.0718	52	.3246	.0108
22	.9465	.0656	53	.3141	.0103
23	.9002	.0601	54	.3040	.0099
24	.8631	.0552	55	.2943	.0095
25	.8314	.0508	56	.2850	.0092
26	.8028	.0469	57	.2761	.0088
27	.7761	.0434	58	.2676	.0085
28	.7506	.0402	59	.2595	.0082
29	.7258	.0374	60	.2516	.0079
30	.7017	.0348			

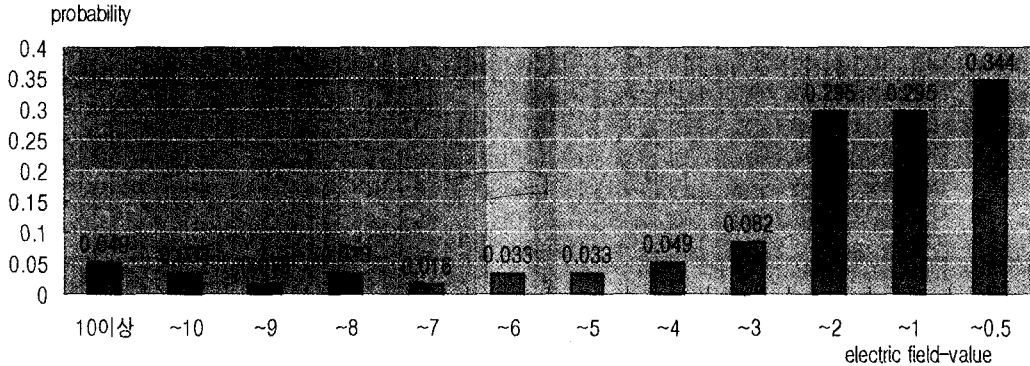


Fig. 3. The sample of electric field value

$$\mu_{\text{hazardous}} = \{ (10, 0.5) (9, 0.3543) (8, 0.2315) \\ (7, 0.1419) (6, 0.0832) (5, 0.0474) \\ (4, 0.0266) (3, 0.0148) (2, 0.0082) \\ (1, 0.0045) (0, 0.000) \}$$

또한 식(39)를 이용하여 피지사건 $\mu_{\text{hazardous}}$ 의 확률 $P(\mu_{\text{hazardous}})$ 가 $P(\mu_{\text{hazardous}} | \alpha)$ 가 될 가능성은 α 가 된다. 즉 피지사건 $\mu_{\text{hazardous}}$ 의 피지확률은 다음과 같다.

$$P(\mu_{\text{hazardous}}) = \{ (1, 0.5) (0.655, 1) (0.360, 2) \\ (0.278, 3) (0.229, 4) (0.196, 5) \\ (0.163, 6) (0.147, 7) (0.114, 8) \\ (0.098, 9) (0.082, 10) (0.049, 11) \}$$

따라서 측정된 전계값의 최대치인 10.9540[kV/m]는 피지언어변수를 이용하여 표현할 경우 다소 위험한 수준이지만 발생될 가능성은 4.9%로 아주 낮은 가능성을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

또한 피지정도의 척도를 구하기 위하여 식(40)을 이용하여 앞서 구한 피지확률값을 적용시키면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} f(A) = & - [(1 \log_2 1 + 0) + (0.665 \log_2 0.665) \\ & + (0.655 \log_2 0.655) + (0.345 \log_2 0.345) \\ & \vdots \\ & + (0.049 \log_2 0.049) + (0.951 \log_2 0.951)] \\ = & 7.036 \end{aligned}$$

이 값을 이용하여 정규화된 척도를 구하면

$$\hat{f}(A) = \frac{f(A)}{|X|} = \frac{7.036}{12} = 0.586$$

이 값이 의미하는 것은 정규화된 척도가 1일 때 가장 불확실성이 높으므로 0.586의 값은 불확실성이 낮으며 앞서 제시한 가능성이 크다는 것을 의미한다.

6. 결론

송전선로의 전압·전류에 대한 전자계가 인체에 미치는 안전도는 정상상태의 계통보다는 비정상상태가 더욱 심각하게 나타난다. 그러므로 본 연구에서는 2회선 송전선로 뿐만 아니라 1선지락 고장 등의 원인으로 1회선만으로 송전을 하는 경우에 대해서도 인체에 미치는 안전도를 평가할 수 있도록 전자계 평가 범위를 확장하였다. 또한 계통부하의 증감에 따라 모션전압이 변화되고 이 전압변화는 다시 부하를 변화시키는 부하의 자기제어 특성을 고려할 수 있도록 부하를 전압의 4차 함수로 표현하였으며 사례연구를 통하여 제한한 방법론의 타당성과 효용성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 송전선로 모델링을 불평형 2회선으로 확장함으로써 2회선 중 1회선차단 등 비상 운영시의 모션전압 및 선로 전류를 정확하게 파악할 수 있다.
- 2) 부하의 전압 특성을 고려함으로써 부하변동에 대한 전자계의 영향을 보다 실질적이고 정확하게 산정할 수 있다.
- 3) 송전선로의 전자계 영향이 계통의 불평형 정도에 따라 심각하게 나타났으나 피지 확률 및 피지 가능성 척도는 매우 낮은 것으로 나타났으며 송전선로의 심각한 불평형시에도 인체에 미치는 안전도는 문제가 없는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 김준권 외 “전력전송공학”, 청문각, 2000. 1.
- 2) 김상철 외 “불평형계통에서의 전자계에 대한 인체안전평가”, 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 3, pp. 54~62, 1999.

- 3) 송현선, "3상 조류계산에 의한 대규모 배전계통의 불평형상태 평가", 한국조명·전기설비학회지, Vol. 13, No. 1, pp. 86~93, 1999.
- 4) J. Arrillaga and c. p. Arnold, "Computer Modelind of Electrical power systems", John Wiley son, 1983.
- 5) EPRI 보고서, RP 894-3, 1978.
- 6) Fan Zhang, Carol s. Cheng, "A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis", IEEE Trans. on power systems, Vol. 12, No. 1, pp. 389~397, February, 1997.
- 7) 김상철 외, "제천지역 전력부하변동에 따른 인체 안전 판단방법에 대한 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 69~77, 2000
- 8) Klir, G. J., and Folger, T. A., 'Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information', Prentice Hall: Nwe Jersey, 1988.
- 9) 김상철, 김두현, "계통상태를 고려한 송전선의 ELF 전자계", 한국산업안전학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 75~80, 1996.