論 文 14-3-8

불평형 계통에서의 전자계에 대한 인체안전평가

Safety Assessment of Human Body for the Electromagnetic Field of Unbalanced Power System

김 상 철* · 송 현 선** · 김 두 현***
S.C. Kim · H.S. Song · D.H. Kim
(1999년 2월 24일 접수, 1999년 6월 8일 채택)

ABSTRACT

This paper presents a study on the safety assessment of human body for electromagnetic field at unbalanced power system. The 3-phase load flow algorithm uses Newton-Raphson method based on Taylor series expansion of power flow equations in rectangular coordinates. The use of such a method can result in a solution with good convergence characteristics. 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 24bus system to validate the usefulness. The results for an unbalanced power system are compared with the results for a balanced power system.

1. 서 론

전력계통은 매년 증가하는 전력수요로 송전계통이 대용량 장거리화되고 부하의 지역적 편중과 각 상별 부하의 불평형 및 고전압 장거리 송전선로의 공간적인 배열 등으로 전력계통에서의 불평형 현상은 불가피하다. 또한 최근 전력설비에 전력반도체 소자의 사용이 점점 확대됨에 따라 전자계의 상호간섭으로 송전계통의 불평형상태는 더욱 가중되고 고조파 및 파의 왜형율이 증가하는 현상이 발생하고 있다. 이러한 전력계통의 불평형 상태를 평가하는데는 3상전력조류계산이 필요하다[1~5].

3상전력조류계산은 발전기, 변압기, 송전선과

* 세명대학교 산업안전공학과
** 세명대학교 전기공학과
*** 충북대학교 안전공학과

부하 등이 복잡하게 결합된 전력시스템에서 송전선 상호간의 유도결합을 고려하고 상별 불평형 부하와 발전출력에 대한 전력계통 각 부분의 전압, 전류 및 선로조류의 분포상태를 해석하는 것이다. 불평형 전력계통의 전압, 전류는 대칭좌표법에 의하여 정상분, 역상분 및 영상분으로 나누어 해석하는데 이들 중 역상전류는 동기기의 회전자를 과열시키는 원인이 된다. 영상전류는 인근 통신선로에 전압이 유도되어 통신장해 현상뿐만 아니라 대지로 흐르는 지락전류에 의한 감전사고로 인명피해를 유발하는 등 계통설비 운용의 장애요소가 되고 있다[6]. 그러나 지금까지는 계통의 선로정수와 부하가 각 상별로 균등하게 분포된 것으로 가정하고 한 상에 대해서만 조류계산하여 전압·전류를 파악하고 이 값을 토대로 전자계를 계산하여 인체에 미치는 안전평가를 실시하였으나 이 결과는 선로정수와 부하가 각 상별로 불균등하게 분포된 실계통과는 많은 거리감이 있다. 그러므로 인체의 안전과 같은 중요한 문제를 평가하는데는 계통의 불평형 정도를 고려하여 각 상별 전압·전류 및 전자계 분포를 정확하게 평가할 필요가 있다.

계통의 불평형 상태를 해석하기 위하여 계통 구성 설비 중 발전기는 대칭분 임피던스 행렬로, 변압기는 결선방식에 따라 상호결합관계를 고려하여 어드미턴스 행렬로 등가화하였다. 송전선로는 직렬저항과 각 상간의 상호결합을 고려한 인덕턴스를 직렬임피던스로, 각 선간과 대지간 및 가공지선의 영향을 고려하여 병렬어드미턴스로 모델링하였다[5]. 3상 전력조류계산법으로는 뉴톤-랩슨법(Newton-Raphson method)과 Z_{BUS} 가우스법(Gauss method)이 널리 사용되고 있는데 뉴톤-랩슨법은 수렴특성이 탁월한 잇점이 있다. 그러나 자코비안행렬을 기억하는데 어드미턴스 행렬인 Y_{BUS}의 4배 정도의 큰 기억용량이 필요할 뿐만 아니라 매 반복시 이 행렬을 계산해야 하는 난점이 내재되어 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 프로그래밍시 sparsity 기법과 삼각인수화(triangular factorized)기법을 도입·적용함으로써 양호한 수렴성과 경제적인 기억량으로 안정되게 해를 구할 수 있도록 하였고, 이를 24모선 불평형 3상 전력계통에 적용하여 모선전압 및 선로에 흐르는 전류를 해석하였다.

이러한 해석결과를 이용하여 전계 및 자계값을 계산하였으며, 이 값을 토대로 인체안전평가를 실시하였다. 인체안전평가는 기존의 보통집합(crisp set)이론에 근거한 안전기준치를 적용하지 않고, 퍼지언어변수를 적용함으로서 실질적으로 인간이 위험을 느낄 수 있는 기준치를 제시할 수 있게 하였다[7]. 퍼지언어변수의 적용에 있어서는 먼저 본 연구에 적합한 퍼지변형자 함수를 생성하고 이 함수를 이용하여 퍼지집합의 소속함수를 구하고 소속함수에 의한 안전기준치 설정이 적합한 것인가를 퍼지 정성자 용어를 이용하여 분석하였다[8].

2. 불평형 3상 전력계통의 모델링

송전선, 변압기 및 발전기로 구성된 불평형 전력계통에서 이들 계통요소의 등가회로로부터 어드미턴스 및 임피던스로 정식화하였다. 또한 3상 송전선을 선로저항 및 각 상간의 상호결합을 고려한 직렬인덕턴스와 병렬커패시턴스로 모델링하고 이를 등가 π 형회로로 나타낸다[9].

2.1 직렬임피던스

가공지선 g와 중성선을 포함한 Fig. 1과 같이 상호결합된 3상 송전선에서 a상의 전압방정식은

$$Va - Va' = (r_a + j\omega L_a)Ia + j\omega L_{ab} I_b + j\omega L_{ac} I_c + j\omega L_{ag} I_g - j\omega L_{an} I_n + V_n \quad \cdots\cdots (1)$$

로 되고, 중성선 n의 전압, 전류관계식은 다음과 같이 된다.

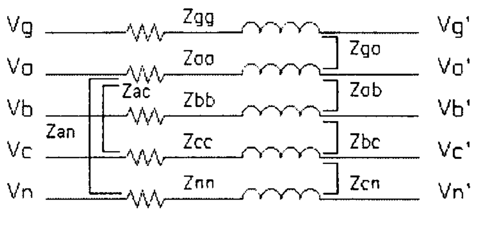

Fig. 1 Three phase transmission series impedance equivalent

$$I_n = I_a + I_b + I_c + I_g \quad \cdots\cdots (2)$$

$$V_n = (R_n + j\omega L_n) I_n - j\omega L_{an} I_a - j\omega L_{nb} I_b - j\omega L_{nc} I_c - j\omega L_{ng} I_g \quad \cdots\cdots (3)$$

식(2), (3)을 식(1)에 대입하면

$$V_a - V_a' = Z_{aa-n} I_a + Z_{ab-n} I_b + Z_{ac-n} I_c + Z_{ag-n} I_g \quad \cdots\cdots (4)$$

단, $Z_{aa-n} = R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n$

$Z_{ab-n} = j\omega L_{ab} - j\omega L_{an} - j\omega L_{bn} + R_n + j\omega L_n$

$Z_{ac-n} = j\omega L_{ac} - j\omega L_{an} - j\omega L_{cn} + R_n + j\omega L_n$

로 되고, 식(4)로부터 가공지선을 포함한 3상 송전선로의 전압·전류관계식을 행렬로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{abc} - V_{a'b'c'} \\ \hline V_g - V_{g'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A \; Z_B \\ \hline Z_C \; Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ \hline I_g \end{bmatrix} \quad \cdots (5)$$

여기서 가공지선의 전압이 0이므로 식(5)에 Kron의 reduction을 적용하면 3상 송전선의 직렬임피던스행렬 Z_s는 다음과 같이 된다.

$$Z_S = Z_A - Z_B Z_D^{-1} Z_C = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

2.2 병렬어드미턴스

가공지선 g를 포함한 3상 송전선의 정전용량 관계를 나타낸 Fig. 2에서 병렬어드미턴스행렬 Y_p를 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$Y_p = j\omega \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (7)$$

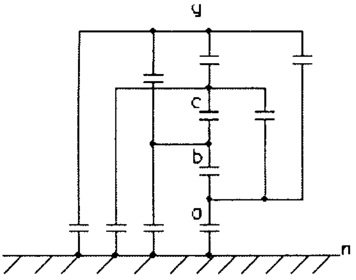

Fig. 2 Three phase transmission shunt admittance equivalent

이상의 직렬임피던스와 병렬어드미턴스 행렬을 π형 등가회로 표현하면 Fig. 3과 같고, 장거리 송전선의 경우에는 π형 등가회로를 종속 접속하여 다단으로 모델링할 수 있도록 하였다.

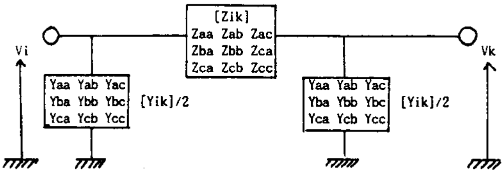

Fig. 3 π equivalent transmission-line circuit

3. 3상 전력조류계산 알고리즘

3상 전력조류계산은 각 모선별로 주어진 변수들의 제약조건으로부터 전력계통의 불평형상태를 파악하기 위한 것으로 비선형으로 표현된 전력편차 방정식의 해를 구하는 것이다.

모선 i에 대한 전력편차방정식은

$$\Delta S_i = S_{G,i} - S_{D,i} - S_i(V, \theta) \quad \cdots\cdots (8)$$

여기서 i발전기 출력 $S_{D,i}$는 경제급전 계획에 의해 사전에 계획된 값이고, 부하 $S_{D,i}$는 수요상정에 의해 지정된 값이다. 식(8)에서, 모선 i의 3상 p에 대한 전력방정식을 유효분과 무효분으로 나누어 표현하면

$$\Delta P_i^P = P_{G,i}^{SP} - P_{D,i}^{SP} - V_i^P \sum_{k=1}^{n} \sum_{m=1}^{3} V_k^m (G_{ik}^{pm} \cos\theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin\theta_{ik}^{pm}) \quad \cdots\cdots (9)$$

$$\Delta Q_i^P = Q_{G,i}^{SP} - Q_{D,i}^{SP} - V_i^P \sum_{k=1}^{n} \sum_{m=1}^{3} V_k^m (G_{ik}^{pm} \sin\theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos\theta_{ik}^{pm}) \quad \cdots\cdots (10)$$

여기서, V_i^P, V_k^m : 모선 i의 P상과 모선 k의 m상의 전압크기

$\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m$: 모선 i의 p상 위상과 모선 k의 m상 위상과의 차

G_{ik}^{pm}, B_{ik}^{pm} : 모선 i의 p상 위상과 모선 k의 m상에 관련된 어드미턴스 행렬의 유효분과 무효분

뉴톤-랍슨 전력조류계산 알고리즘은 식(8)의 전력편차방정식으로부터 상태변수 V, θ에 대한

테일러 급수전개하여 1차항만으로 표현하면

$$\Delta S(V+\Delta V,\ \theta+\Delta\theta)\approx\frac{\partial\Delta S}{\partial\theta}\Delta\theta+\frac{\partial\Delta S}{\partial V}\Delta V \quad\cdots\cdots(11)$$

식(11)를 유효전력과 무효전력으로 나누어 표현하고

$$\Delta P_i^p=\frac{\partial\Delta P_i^p}{\partial\theta_k^m}\Delta\theta_k^m+\frac{\partial\Delta P_i^p}{\partial V_k^m}\Delta V_k^m \cdots(12)$$

$$\Delta Q_i^p=\frac{\partial\Delta Q_i^p}{\partial\theta_k^m}\Delta\theta_k^m+\frac{\partial\Delta Q_i^p}{\partial V_k^m}\Delta V_k^m \cdots(13)$$

식(9), (10) 및 식(12), (13)으로부터 감도를 유도하면 다음식과 같다.

$$\Delta P_i^p=\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{3}(H_{ik}^{pm}\Delta\theta_k^m-N_{ik}^{pm}\Delta V_k^m) \quad\cdots\cdots(14)$$

$$\Delta Q_i^p=\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{3}(M_{ik}^{pm}\Delta\theta_k^m-L_{ik}^{pm}\Delta V_k^m) \quad\cdots\cdots(15)$$

여기서

$$H_{ik}^{pm}=\frac{\partial\Delta P_i^p}{\partial\theta_k^m}=V_i^pV_k^m(G_{ik}^{pm}\sin\theta_{ik}^{pm}-B_{ik}^{pm}\cos\theta_{ik}^{pm})$$

$$N_{ik}^{pm}=\frac{\partial\Delta P_i^p}{\partial V_k^m}=V_i^p(G_{ik}^{pm}\cos\theta_{ik}^{pm}-B_{ik}^{pm}\sin\theta_{ik}^{pm})$$

$$M_{ik}^{pm}=\frac{\partial\Delta Q_i^p}{\partial\theta_k^m}=-V_i^pV_k^m(G_{ik}^{pm}\cos\theta_{ik}^{pm}-B_{ik}^{pm}\sin\theta_{ik}^{pm})$$

$$L_{ik}^{pm}=\frac{\partial\Delta Q_i^p}{\partial V_k^m}=-V_i^p(G_{ik}^{pm}\sin\theta_{ik}^{pm}-B_{ik}^{pm}\cos\theta_{ik}^{pm})$$

식(14), (15)의 감도행렬을 모선 i의 3상에 대한 대각요소와 모선 I,k에 대한 비대각 요소로 나누어 표현하면 각각 다음과 같이 표현된다.

뉴톤-랍슨 전력조류계산은 반복법에 의하여 비선형 전력방정식의 해를 구하는 것이다.

식(14), (15)의 k번째 반복계산시의 전력편차 방정식은

$$\begin{array}{c|cccccc|} & \Delta\theta_i^1 & \Delta V_i^1 & \Delta\theta_i^2 & \Delta V_i^2 & \Delta\theta_i^3 & \Delta V_i^3 \\ \hline \Delta P_i^1 & H_{ii}^{11} & N_{ii}^{11} & H_{ii}^{12} & N_{ii}^{12} & H_{ii}^{13} & N_{ii}^{13} \\ \Delta Q_i^1 & M_{ii}^{11} & L_{ii}^{11} & M_{ii}^{12} & L_{ii}^{12} & M_{ii}^{13} & L_{ii}^{13} \\ \Delta P_i^2 & H_{ii}^{21} & N_{ii}^{21} & H_{ii}^{22} & N_{ii}^{22} & H_{ii}^{23} & N_{ii}^{23} \\ \Delta Q_i^2 & M_{ii}^{21} & L_{ii}^{21} & M_{ii}^{22} & L_{ii}^{22} & M_{ii}^{23} & L_{ii}^{23} \\ \Delta P_i^3 & H_{ii}^{31} & N_{ii}^{31} & H_{ii}^{32} & N_{ii}^{32} & H_{ii}^{33} & N_{ii}^{33} \\ \Delta Q_i^3 & M_{ii}^{31} & L_{ii}^{31} & M_{ii}^{32} & L_{ii}^{32} & M_{ii}^{33} & L_{ii}^{33} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{c|cccccc|} & \Delta\theta_k^1 & \Delta V_k^1 & \Delta\theta_k^2 & \Delta V_k^2 & \Delta\theta_k^3 & \Delta V_k^3 \\ \hline \Delta P_i^1 & H_{ik}^{11} & N_{ik}^{11} & H_{ik}^{12} & N_{ik}^{12} & H_{ik}^{13} & N_{ik}^{13} \\ \Delta Q_i^1 & M_{ik}^{11} & L_{ik}^{11} & M_{ik}^{12} & L_{ik}^{12} & M_{ik}^{13} & L_{ik}^{13} \\ \Delta P_i^2 & H_{ik}^{21} & N_{ik}^{21} & H_{ik}^{22} & N_{ik}^{22} & H_{ik}^{23} & N_{ik}^{23} \\ \Delta Q_i^2 & M_{ik}^{21} & L_{ik}^{21} & M_{ik}^{22} & L_{ik}^{22} & M_{ik}^{23} & L_{ik}^{23} \\ \Delta P_i^3 & H_{ik}^{31} & N_{ik}^{31} & H_{ik}^{32} & N_{ik}^{32} & H_{ik}^{33} & N_{ik}^{33} \\ \Delta Q_i^3 & M_{ik}^{31} & L_{ik}^{31} & M_{ik}^{32} & L_{ik}^{32} & M_{ik}^{33} & L_{ik}^{33} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta P^{k-1}\\ \Delta Q^{k-1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H^{k-1} & N^{k-1}\\ M^{k-1} & L^{k-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta^k\\ \Delta V^k\end{bmatrix}\cdots(16)$$

로 표현되며, 이를 Fig. 4와 같은 계산 절차에 따라 Jacobian행렬을 전진 및 후진 대입법에 의하여 구하고 수렴 여부를 판정한다[9]. 여기서 부하모선의 경우는 종래 평형상태의 단상조류계산과 동일하게 각 상 유효전력과 무효전력을 기지값으로 하고 전압의 크기와 위상각을 미지변수로하여 전력편차방정식으로부터 구한다.

$$I_G^{abc}=(V^{abc}-E_I^{abc})*Y_G^{abc} \quad\cdots\cdots(17)$$

$$P_G+jQ_G=V_{abc}*I_G^{abc*} \quad\cdots\cdots(18)$$

P_G는 P_{spec}으로, Q_G는 발전기 코일의 열적상태를 고려하여 상한(Q_{Gmax}) 및 하한 (Q_{Gmin})으로 치환하고 부하모선과 같이 처리한다. 또한 발전기 모선의 전압은 정상분 전압 V_1을 정해진 전압크기 V_{spec}으로 치환하여 일정하게 유지한 후 상전압 V_{abc}와 출력 P_G와 Q_G를 식(18)에 대입하여 I_I을 구하고, 이를 다시 식(17)에 대입하여 E_I^{abc}를 구한다. 기준모선의 경우는 1상에 대한 전압위상각과 정상분 전압크기를 기지값으로 하여 모선전압의 기준벡터로 지정하여 발전기모선에서 기지로 처리한 유효전력을 미지값으로 하여 선로손실을 담당하게 된다.

4. 인체안전평가

4.1 전계

전체집합 U내에 정의된 퍼지 집합에 T(x) 내의 용어를 대응시켜 나온 퍼지 집합의 소속함수 $\mu_{hazardous}(u)$를 인체 안전평가의 기준에 적합하도록 새로운 소속함수 식(19)와 같이 만들었다. 여기서 u는 전계값을 나타내는데 일반적으로 전계값이 20 kV/m를 넘어서면[8,10] 인체에 아주 위험한 것으로 판단되므로 식(19)를 적용하였다.

$$\mu_{hazardous}(u) = 1 \qquad u \in [20, \infty]$$

$$\alpha_1\left[1+\tanh\left(\frac{\alpha_2-\alpha_3}{\alpha_4}\right)\right] \qquad u \in [0, 20] \qquad (19)$$

위 식에서 $\alpha_1, \cdots, \alpha_4$는 퍼지 집합의 소속함수를 결정하는 인자다. 각국에서 제시한 인체안전 기준치를 근거로 인체위험 측면을 고려하여 전계값이 20 kV/m를 넘어서면 소속함수값이 1이 되게 결정하였고 20 kV/m에 근접한 값들은 상대적으로 높은 값을 설정하였다. 또한 비교적 낮은 값으로 분류되는 전계값에 대하여는 소속함수의 값을 다소 작게 설정하였다.

4.2 자계

ELF 자계의 안전기준치는 앞서 기술한 ELF 전계의 경우와 같으며 T(x)내의 용어를 대응시켜 나온 퍼지 집합의 소속함수 $\mu_{hazardous}(u)$는 인체 안전평가의 기준에 적합하도록 식(20)과 같이 새로운 소속함수로 만들었다. 여기서 u 값은 자계값의 범위를 나타내는데 일반적으로 자계값이 10G를 넘어서면 인체에 아주 위험하다는 판단에 따라 아래와 같은 범위를 적용하였다.

$$\mu_{hazardous}(u) = 1 \qquad u \in [10, \infty]$$

$$\beta_1\left[1+\tanh\left(\frac{\beta_2-\beta_3}{\beta_4}\right)\right] \qquad u \in [0, 10] \qquad (20)$$

여기서 $\beta_1, \cdots, \beta_4$는 전계의 경우와 마찬가지의 의미로 설정하였는데 자계값이 10G 이상을 최고 기준치로 정하였다.

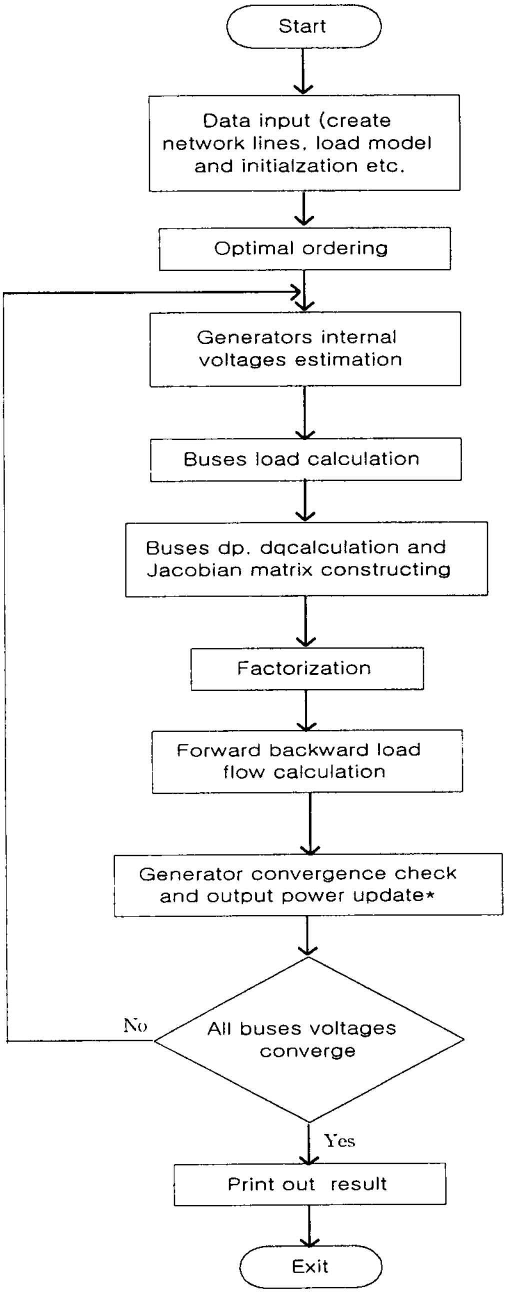

Fig. 4 Newton-Raphson three-phase load flow algorithm

5. 사례연구

본 연구에서 제시한 3상 조류계산 알고리즘 및 퍼지언어변수를 이용한 인체안전평가방법의 효용성 및 적용가능성을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같은 24모선 345kV 모델계통을 이용하였으며, 이 계통을 이용하여 개발된 프로그램으로 사로불평형 상태로 구분하여 전압 및 전류값을 계산하였으며, 불평형계통에 있어서의 전자계해석은 참고문헌에 제시되어 있는 철탑제원 자료를 이용하였다[10].

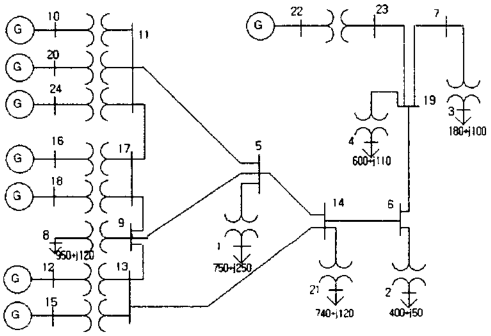

Fig. 5 24 Bus Model System

5.1 선로평형상태

선로의 완전연가로 선로정수가 평형인 모델계통에서 부하가 가장 많이 걸린 모선 1에 대하여 각 상별 분포된 부하전력에 따라 4가지 경우로 나누어 전력조류계산한 결과 모선전압, 선로전류, 전력조류 및 영상분·역상분 불평형율을 Table 1에 나타내었다. 관심선로는 흐르는 전류가 가장 많은 17번 모선에서 9번 모선의 선로를 택하였으며, 정상분 전압에 대한 영상분 불평형율(MO) 및 역상분 불평형율(M2)로 정의하였다.

[CASE 1]

선로정수 뿐만 아니라 부하도 A, B, C상에 균등하게 분포된 평형상태로서 영상분 및 역상분 불평형율이 모두 0이다. 모선전압의 크기는 각 상 모두 348.45kV이고 위상각은 A, B, C상 별로 120° 의 위상차를 모이고 있다. 선로를 통하여 흐르는 전류와 유효·무효전력도 A, B, C상 모두 동일하게 각각 2207.68A, 434.32MW, 92.89 MVar로 나타났다. Fig. 6, 7은 전계 및 자계에 대한 그래프이다. 전계의 경우는 14m에서 최대 8.1458 kV/m를, 자계의 경우는 0 m에서 최대 0.6747 G를 각각 나타내고 있다.

[CASE 4]

선로정수는 평형상태이지만 부하가 A, B, C 상별로 각각 400, 300, 300MW로 분포된 불평형인 상태로서 영상분불평형율 및 역상분불평형율은 각각 0.746%, 1.152%로 영상분보다는 역상분 불평형율이 더욱 심각함을 알 수 있다. CASE 1과는 달리 모선전압의 크기가 A, B, C상별로 상

Table 1 The results of 3 phase power flow for transposed TL (balanced)

구분 \ CASE		선로평형							
		1		2		3		4	
V_{L19}[KV]	A	348.45	24.6	347.42	24.3	346.73	24.1	346.04	23.2
	B	348.45	-95.4	348.11	-95.2	347.76	-95.1	347.76	-94.9
	C	348.45	144.6	349.83	144.6	350.52	144.7	351.56	144.7
I_{L19-7}[A]	A	2207.68		2264.57		2306.83		2350.05	
	B	2207.68		1258.07		2156.62		2133.96	
	C	2207.68		1260.64		2167.02		2148.80	
P+jQ[MW]	A	434.32+j92.89		443.79+j96.84		450.80+j100.12		457.89+j103.75	
	B	434.32+j92.89		428.04+j92.63		423.18+j92.52		418.34+j92.55	
	C	434.32+j92.89		431.79+j89.68		429.77+j87.31		427.78+j85.02	
MO		0.0		0.293		0.453		0.746	
M2		0.0		0.453		0.799		1.152	
부하 모선	1	333 333 333		360 320 320		380 310 310		400 300 300	

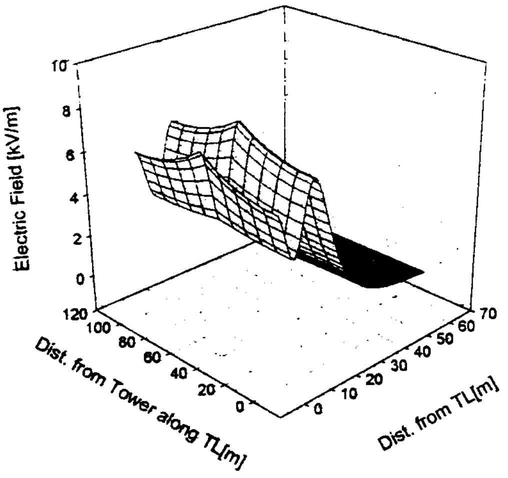

Fig. 6 Electric field intensity according to balanced power system

이하게 나타났으며, C상전압이 351.56kV로서 약 1% 증가되었다. 모선전압의 위상차도 평형상태의 경우와 달리 120° 의 상차각이 아님을 알 수 있다. 또한 선로에 흐르는 전류도 A, B, C상별로 상이하며 A상에 흐르는 전류가 2350.05A로서 CASE 1에 비하여 142.37A가 증가되었고, 전력조류도 A, B, C상별로 상이함을 알 수 있다. 이 값을 근거로 전자계값을 구하면 전계의 경우는 14m에서 8.2159 kV/m를, 자계의 경우는 0m에서 0.7185G를 각각 나타내고 있으며 CASE 1의 전자계값과 비교하면 각각 0,07kV/m 0.034G가 증가됨을 알 수 있다.

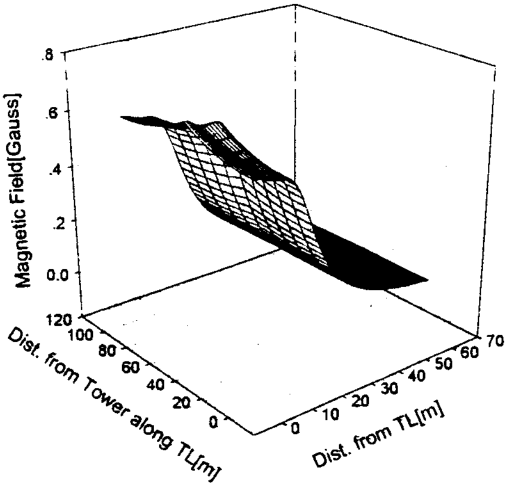

Fig. 7 Magnetic field intensity according to balanced power system

5.2 선로불평형

관심선로는 17번 모선에서 9번 모선의 선로를 택하였으며, 이때 나타난 모선전압과 모선전류의 값은 Table 2와 같다. 또한 영상분 불평형율 및 역상분 불평형율에 대한 기준치의 변화값도 제시되어 있다.

Table 2 The results of 3 phase power flow for transposed TL (unbalanced)

구분 \ CASE		선로불평형			
		5	6	7	8
V_{L19}[KV]	A	349.83 24.7	348.80 24.4	348.11 24.2	347.42 24.0
	B	349.83 -95.4	349.49 -95.2	349.49 -95.0	349.14 -94.9
	C	349.49 144.6	350.52 144.6	351.56 144.6	352.25 144.7
I_{L19} 기[A]	A	2188.22	2233.18	2274.44	2316.49
	B	2187.61	2148.60	2125.10	2103.75
	C	2200.07	2172.79	2154.99	2139.50
P+jQ[MW]	A	433.13+j76.21	422.49+j80.28	449.40+j83.61	456.38+j87.24
	B	433.00+j76.27	426.81+j76.05	422.01+j75.97	417.20+j75.98
	C	435.54+j78.78	433.10+j75.97	431.11+j73.88	429.14+j71.83
MO		0.109	0.290	0.504	0.727
M2		0.148	0.495	0.821	1.157
부하모선	1	333 333 333	360 320 320	380 310 310	400 300 300

[CASE 5]

선로는 불평형상태이며 부하는 평형을 이룬 상태를 말한다. 이때 모선전압의 결과치는 349.83 kV이며, 모선전류의 경우 2200.07A로 나타내고 있다. 이 경우 전계값은 14m에서 8.1692kV/m를, 자계값은 0m에서 0.6726G를 각각 나타내고 있다.

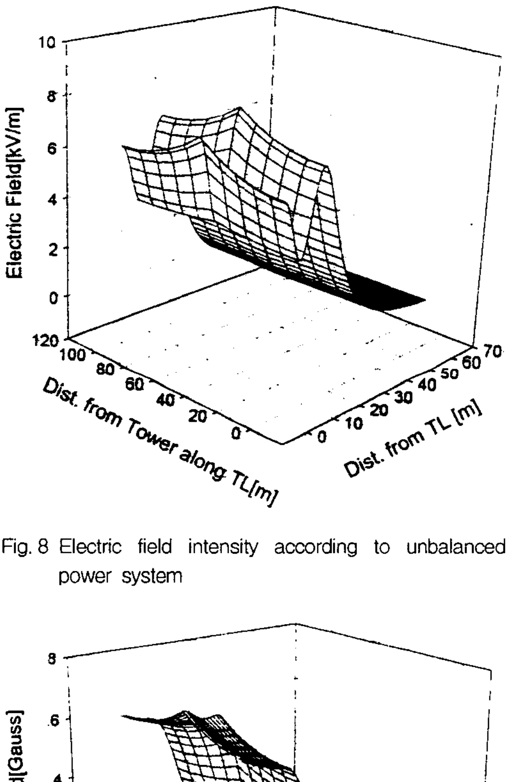

Fig. 8 Electric field intensity according to unbalanced power system

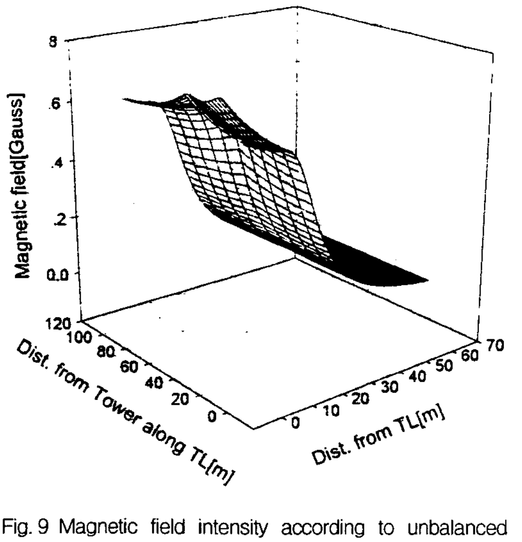

Fig. 9 Magnetic field intensity according to unbalanced power system

[CASE 8]

선로와 부하의 상태가 모두 불평형인 상태를 선정하였다. 부하의 불평형상태는 Table 2에 나타난 것처럼 각 상의 부하가 400, 300, 300인 상태이며, 영상분불평형율 및 역상분불평형율은 각각 0.727%, 1.157%를 나타내고 있다. 이때 관심 모선전압의 결과치는 352.25kV이며, 모선전류의 경우 2316.49A로 나타났다. Fig. 8, 9는 전계 및 자계에 대한 그래프이다. 전계의 경우는 14m에서 8.2393kV/m를, 자계의 경우는 0m에서 0.7080 G를 각각 나타내고 있다.

5.3 인체안전평가

선로평형의 경우나 불평형상태의 경우 전자계의 값은 0.0935kV/m, 0.0333G의 값의 변화를 나타내고 있으며, 또한 부하모선에 걸리는 load가 심각하게 불균형을 나타낼 때 전류값은 큰 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

[전 계]

사례연구를 통하여 나타난 전계값으로 안전평가를 실시하였다. 먼저 퍼지언어변수를 이용한 안전성을 평가하면 전계값의 최고치인 8.2393kV/m에 대하여 "8.2393kV/m is hazardous"와 같은 명제인 경우, 소속함수 값 $\mu_{hazardous}(8.2393)=0.2724$가 되고 $\mu_{very\ hazardous}(8.2393)=0.0742$를 나타내고 있다. 이 값을 퍼지정성자를 이용한 "8.2393 is hazardous is very false"라는 명제로 그 진리값을 평가할 경우 0.5602의 진리값을 나타내고 있다. 따라서 8.2393kV/m에 대하여는 위험도가 비교적 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다.

[자 계]

사례연구를 통하여 나타난 자계값으로 안전평가를 실시하였다. 먼저 퍼지언어변수를 이용한 안전성을 평가하면 자계값의 최고치인 0.7185G에 대하여 "0.7185G is hazardous"와 같은 명제인 경우, 소속함수 값 $\mu_{hazardous}(0.7185)=0.0052$가 되고 $\mu_{very\ hazardous}(0.7185)=0.000028$를 나타내고 있다. 따라서 최고치인 0.7185G에 대한 위험도는 거의 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있

다.

6. 결 론

불평형 계통상태를 해석하기 위하여 24모선 불평형 전력계통의 3상 조류계산을 실시하였다. 3상 조류계산은 수렴성이 탁월한 뉴톤-랩슨법에 sparsity기법과 삼각인수화 기법을 도입하여 프로그래밍함으로써 양호한 수렴특성을 유지하면서 경제적인 기억용량으로 안정되게 해를 구할 수 있었다. 또한 사례연구를 통하여 제안한 방법론의 타당성과 효용성을 검토하였으며, 본 연구의 주요특징은 다음과 같다.

1) 변압기 결선방식에 따른 상호결합관계와 선로정수에 각상의 상호결합 및 가공지선의 영향을 고려하여 3상 불평형 계통을 모델링함으로써 가공지선을 고려하지 않는 경우와 비교하여 송전계통의 전자계해석에 신뢰성을 개선하였다.
2) 선로평형이나 선로불평형상태에 있어서 전자계값의 변화는 크게 없는 것으로 나타났으나, 부하변동이 클 경우에 있어서는 전압 및 전류의 변동폭이 크게 나타남을 알 수 있었다.
3) 인체안전평가를 실시함에 있어 인간이 느낄 수 있는 실질적 기준치를 퍼지언어변수를 이용하므로서 안전성평가의 타당성을 확보할 수 있었다.

참 고 문 헌

1) R.G. Wasley and M.A. Shlash, "Newton-Raphson Algorithm for 3-Phase Load Flow", Proc.IEE, Vol. 121, No. 7, pp. 630~638, July, 1974.
2) J. Arrillage and B.J. Harker, "Fast-Decoupled Three-Phase Load Flow", Proc.IEE, Vol. 9, No. 4, pp. 743~740, August, 1978.
3) A.Y. Sivaramkrishnam et al, "Thase-Phase Load Flow Algorithm", IE(I)jour, Vol. 60, pp. 240~243, April, 1980.
4) M.A. Laughton and A.O.M. Saleh, "Unified Phase-Coordinate Load-Flow and Fault Analy-sis of Poly-Phase Networks", Electrical Power & Energy System, Vol. 2, No. 4, October, 1980.
5) J. Arrillage and C.P. Arnold, "ComputerModelling of Electrical Power System", John Wiley Son, 1983.
6) 윤용범, 추진부, "송전계통에서의 영상 순환전류 감소를 위한 최적 상배열 결정 기법", 전기학회 논문지 47권 5호, pp. 563~567, May, 1998.
7) H.J. Zimmerman, "Fuzzy set theory and its applications, KiuwerNijhoff Publishing : Hingnam, MA, p. 363, 1985.
8) 김상철, 김두현, "계통상태를 고려한 ELF 전자계의 인체안전평가를 위한 퍼지언어변수 접근법", 한국산업안전학회지, Vol. 12, No. 2, pp. 70~79, June, 1997.
9) 김준현외3, "전력계통의 불평형해석을 위한 3상 조류계산", 전기학회논문지, 40권, 10호, pp. 969~983, October, 1991.
10) 김상철, 김두현, "계통상태를 고려한 송전선의 ELF 전자계", 한국산업안전학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 75~80, 1996.