

다중사고의 고장전류 해석연구

오 용 택

문 영 현

연세대학교 전기공학과\*

Simultaneous Fault Current Analysis

Oh Yong Taek

Moon Young Hyun

Dept. of Electrical Eng. Yonsei Univ.

1. 서론

전력계통의 복잡화, 대규모화에 따라 고장대책수립의 기본이 고장전류 해석이다. 고장해석에 있어 종래에는 단순사고만을 주로 취급하여 고장이 계통에 미칠 수 있는 가장 심각한 상태에 대한 대책수립이 주가 되었다. 그러나, 계통이 확장됨에 따라 보다 엄격한 안정성이 요구되므로, 발생확률은 적으나 다중사고에 대한 연구가 필요하게 되었다. 다중사고에 대한 연구는 1970년 Dyriacco, Ramarao<sup>4)</sup>가 다중사고의 하나로 선로 단사고(end fault)해석을 취급한 바가 있으나 해석상의 난이성 때문에 큰진전을 보지 못했다.

1980년에 들어서면서 Roy, Rao<sup>3)</sup>들은 다중상 모델(poly-phase modelling)방법으로 개방회로를 포함한 다중사고 해석방법을 제시하였으며 이 방법은 계통의 시물레이션이 정확하다는 장점은 있으나 계통 전체를 시물레이션하는데 행렬규모가 너무 방대하여 계산시간이 길어지는 등 문제점이 있다. 또한, Han<sup>2)</sup>은 다중단자 망(port)회로에 의한 다중사고해석에 있어서 다중사고 parameter를 간단히 계산할 수 있는 알고리즘을 제시하고 있으나 선로단사고(end fault)해석이 복잡하고 이론이 명확히 정리되지 못한 점등 개선할 소지가 많다.

본 연구에서는 다중사고에 의해 변화되는 모선어드미턴스 변화분( $\Delta Y_{bus}$ )을 행렬연산 관계식으로 이용하여 등가임피던스를 계산하고 다중고장 포트행렬을 구성하여 각 고장점을 상별로 연결함으로써 다중사고 고장전류를 계산하였으며, 또한 이 방법은 선로 상호 결합(mutual coupling)을 비교적 간단히 처리할 수 있었고 계산속도를 현저히 개선시킬 수 있음이 실계통에 대한 사례연구에서 입증되었다.

2. 다중 고장 전류 해석

전력계통에서 발생하는 다중고장점을 포트이론으로 적용하는데 포트 파라미터를 계산하기 위해서는 단상 지락과 2상개방과 같이 각 Sequence network 전압의 총화가 0인 직렬형태의 고장과, 2선지락과 단상개방과 같은 각 Sequence network 전류의 총화가 0인 병렬형태의 고장으로 분류하여 취급한다.

2-1. 다중포트 방법에 의한 고장전류계산

직렬형태의 고장점 단자전압과 병렬형태의 고장점 단자전압, 고장점 단자전류, 고장점 개방회로 전압을  $V_s(i), V_p(i), I_s(i), I_p(i), V_s(0), V_p(0)$ 라 하면 포트 행렬식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_s(i) \\ V_p(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ss}(i) & Z_{sp}(i) \\ Z_{ps}(i) & Z_{pp}(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(i) \\ I_p(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s^{(0)} \\ V_p^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

단,  $i=0,1,2$ 는 영상분, 정상분, 역상분을 나타낸다.

여기서,  $Z_{ss}(i), Z_{pp}(i)$ 는 직렬고장 형태와 병렬고장 형태 각각의 자기 임피던스 행렬이고,  $Z_{sp}(i), Z_{ps}(i)$ 는 직렬고장과 병렬고장 형태의 상호 임피던스행렬이다. 고장해석을 위하여 Sequence network를 구성할 수 있으며 Sequence network상에서 고장단자(Fault port)에 전압 전류관계식은 다음과 같다.<sup>2)</sup>

$$\begin{bmatrix} V_s'(i) \\ I_p'(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{ss}(i) & 0 \\ 0 & N_{pp}(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{ss}(i) & A_{sp}(i) \\ A_{ps}(i) & A_{pp}(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{ss}(i) & 0 \\ 0 & N_{pp}(i) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_s(i) \\ V_p(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{ss}(i) & V_s^{(0,0)} \\ N_{pp}(i) & I_p^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

단,  $V_s'(i), I_p'(i)$ ; 직렬형태의 상전압과 병렬 형태의 상전류

$A_{ss}(i), A_{sp}(i), A_{ps}(i), A_{pp}(i)$ ; 고장형태  
별로 부분분해하여 수정한  
임피던스행렬

여기서, 다중사고의 시뮬레이션에 있어서 단자망  
회로의 단자경계조건을 적용시키기 위하여 이상적  
상변환 변압기를 사용하고 있으며 위식에서  $N_s(i)$ 와  $N_p$   
( $i$ )는 직렬형태 및 병렬형태 고장에 대한 회로의  
상변환 권선비를 나타낸다.

고장점에 대하여 Sequence network 전압의 총화가  
0인 직렬형태의 고장과 Sequence network 전류의  
총화가 0인 병렬형태의 고장경계조건을 식 (2)에  
대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} I_s(i) \\ V_p(i) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} N_s(i) & 0 \\ 0 & N_p(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{ss} & A_{sp} \\ A_{ps} & A_{pp} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_s V_s^{(00)} \\ N_p I_p^{(00)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

상기 식에서 직렬형태 고장포트 전류와 병렬형태 고장  
포트전압이 구해진다. 또한식 (2)에 대입하므로써  
직렬형태 고장전압과 병렬형태 고장전류를 계산할 수  
있다.

2-2.  $\Delta Y_{bus}$  분해법에 의한 다중사고 고장포트  
임피던스 계산

다중사고의 고장점을 새로운 모선으로 취급하여  
원래의 모선 임피던스 행렬을 수정해야 하는데 이  
방법은 상당한 계산시간을 소요한다.

고로 고장에 따른 모선 어드미턴스 변화분( $\Delta Y_{bus}$ )  
분해법에 의해 고장등가임피던스를 계산하였고 이  
방법은 계산소요시간을 대폭 감소시킨다. 전형적인  
다중사고로서 1선지락이 이중사고로 발생하는 사고(  
그림1)에 대하여 연구한다.

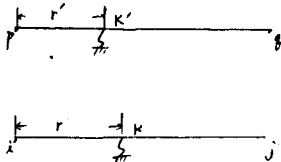


그림1. 1선지락 이중사고

여기서, K와 K'는 선로에서 고장이 발생한 점이고,  
 $r$ 과  $r'$ 은 고장위치를 [%]거리로 나타낸다. 등가임피  
던스를 계산하기 위한 과정은 행렬연산을 이용한  
branch 및 link 추가과정을 거쳐 간단히 해석할 수  
있다.

- 즉, a) 고장선로를 계통에서 제거하고 고장점의 계  
통에 대한 모선 어드미턴스 행렬과 기존모  
선 임피던스 행렬  $Z_{bus}$ 의 관계식을 유도  
한다.  
b) 고장점을 두개의 node로 생각하여 node를  
추가하는 형태의 원시 임피던스행렬을 구  
성할 수 있고, 원시 어드미턴스와의 역행렬  
관계를 이용 원시어드미턴스 행렬을 계산할  
수 있다.  
c) 고장점의 연결관계를 고려하여 두개의branch  
link동시 추가 알고리즘을 적용시킨다.  
이 과정을 통하여 구해진 고장후의 모선  
어드미턴스는 아래 식과 같다.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{bus}^{(0)} + p d^{-1} p^T + p' d'^{-1} p'^T & p & p' \\ p^T & d & 0 \\ p'^T & 0 & d' \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $p = Z_{kk}^{-1} K3 \begin{bmatrix} -1/r \\ 1/(1-r) \end{bmatrix}$      $d = Z_{kk}^{-1} / r(1-r)$

$p' = Z_{pp}^{-1} K4 \begin{bmatrix} -1/r' \\ 1/(1-r') \end{bmatrix}$      $d' = Z_{pp}^{-1} / r'(1-r')$

$Z_{kk}$ 와  $Z_{pp}$ 는 모선  $ij$ 와 모선  $pq$  간의 선로  
임피던스 이고  $K3$ 와  $K4$ 는 고장 모선의  
연결관계를 나타내는 vector로서 다음과 같  
이 정의된다.

$$K3 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$K4 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

- d) 고장에 의하여 변화한 계통의 모선 임피  
던스  $Z_{bus}$ 는  $Y_{bus}$ 와의 역행렬 관계를 이용  
하여 계산한다. 즉 기존의 factor table로  
부터 고장후의 모선 임피던스를 계산할  
수 있으며 그 관계식은 아래와 같다.

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ik} & Z_{ik'} \\ Z_{ki} & Z_{kk} & Z_{kk'} \\ Z_{k'i} & Z_{k'k} & Z_{k'k'} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

$Z_0 = Z_{bus}^{(0)}$

$Z_{ik} = (1-r) Z_{bus}^{(0)}(i) + Z_{bus}^{(0)}(j)$

$Z_{ik'} = (1-r') Z_{bus}^{(0)}(i) + r' Z_{bus}^{(0)}(j)$

$Z_{kk} = r(1-r) Z_{kk} + (1-r) Z_{bus}^{(0)}(i) + (1-r') Z_{bus}^{(0)}(j) + r^2 Z_{bus}^{(0)}(j)$

$$Z_{KK'} = V'(1-r') Z_{pp} + (1-r')^2 Z_{pp}^{(0)} + V'(1-r') Z_{pp}^{(0)}$$

$$+ r'(1-r') Z_{pp}^{(0)} + r'^2 Z_{pp}^{(0)}$$

$$Z_{KK'} = (1-r') (1-r') Z_{pp} + (1-r') r' Z_{pp}^{(0)}$$

$$+ r' (1-r') Z_{pp}^{(0)} + r'^2 Z_{pp}^{(0)}$$

이상에서 구한 고장점 등가임피던스를 사용하여 다중고장을 해석하는 예로서 그림 1에서와같이 K점과 K'점에서 1선지락사고가 발생한 경우를 고려해 보고자 한다. 각 고장점을 port이론으로 적용하면 2 port로 구성할 수 있고 port에 대한 파라미터를 구성하면 일선지락 사고시는 중성점을 포함하는 사고로서 단자망(port)의 구동점임피던스  $Z_{11}, Z_{22}$  는 식 (6)과 같이 주어지고, 단자망의 전달임피던스  $Z_{12}, Z_{21}$  은 식 (7)과 같다.<sup>2)</sup>

$$Z_{11} (Z_{22}) = Z_{pp} + Z_{KK} - Z_{pK} \quad (6)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{pK} \quad (7)$$

그림1의 1선지락 사고에서  $D_1$  을 K 점으로,  $D_2$  를 K' 점으로 할수 있다. 그러므로  $Z_{11} = Z_{KK}, Z_{22} = Z_{K'K'}$  이며, port의 전달임피던스는  $Z_{12} = Z_{21} = Z_{pK}$  임을 쉽게 알수 있다. 식(3)에 대입함으로써 직렬형태사고의 고장전류를 구할 수 있고 식(1)에 고장전류를 대입함으로써 직렬형태 고장전압을 구할수 있다.

### 3. 계통적용사례

본 연구에서는 IEEE 30 bus 모델계통 data와 실제계통과 유사한 84 bus 모델계통을 1선지락 이중고장에 대하여 시뮬레이션을 하였고 고장해석에 필요한 계산시간은 표1에 주어진 바와 같다. 이것은 제한한 알고리즘의 실용성을 충분히 입증하며 시스템 규모로 보아 상당한 개선이 이루어졌다. 또한 선로 mutual coupling을 효율적으로 처리할 수 있었으며, 본 연구의 전산처리는 IBM 3083 Computer에 의하여 행하여졌다.

표 1. 다중고장전류 계산소요시간(단위:초)

system size	30보선 41선로	78보선 145선로	80보선 151선로	81보선 154선로	84보선 167선로
계산시간	0.23	1.65	2.11	2.27	3.71

### 4. 결론

본 연구에서는 다중고장전류 계산에 있어서 등가임피던스를 계산하는 알고리즘을 제시하였으며 해석

이 어려운 다중사고의 고장전류를 포트이론으로 적용하여 해석하였다. 제시한 알고리즘은 실 계통 적용을 통하여 실용성이 입증되었으며 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- i) 다중사고 고장전류계산에 필요한 등가임피던스 계산방법에 있어 모션어드미턴스 변화분( $\Delta Y_{bus}$ )을 분해하여 적용하는 방법으로서 새로운 알고리즘을 개발하여 계산속도를 개선하였다.
- ii) 개발한 알고리즘은 송전선의 상호결합을 효율적으로 처리할 수 있는 기법을 제시하였다.
- iii) 다중사고의 전형적인 1선 지락 사고에 대하여 다중포트 파라미터를 계산하였고 실제계통의 적용을 가능하게 하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) P.M.Anderson, Analysis of Faulted Power System, The Iowa State University Press/Ames, 1973
- 2) Z.X.Han, " Generalized Method of Analysis of Simulation fault in Electric power system ", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101. No.10, pp. 3933-3942, October 1982
- 3) L.Roy and N.D.Rao, " Exact Calculation of Simulation faults involving Open conductors and Line-to-Ground short circuits on Inherently Unbalanced Power system", ibid, Vol.101, No.8, pp.2738-2746, August 1982
- 4) T.E.Dylicco and K.A.Ramarao, " Short-circuit Calculation for Mutiple line switching and End faults ", ibid, Vol. PAS-89, No.6, Jul./Aug. 1970, pp.1226-1237
- 5) M.A.Pai, Computer Techniques in Power Systwm Analysis, Tata. Mc Graw-Hill publishing Company LTD. 1979.
- 6) C.Gross and H.W.Hong, " A Two-Step compensation Method for solving short Circuit Problems ", IEEE Trans. on power Apparatus and system, Vol.PAS-101.No.6, June 1982, pp.1322-1331
- 7) Stagg and EL-Abiad, Computer Method in Power System Analysis, Mc Grow-Hill Series in Electrical Systems, 1968
- 8) 문영현, 김요희, "Ybus-decomposition 법에 의한 고장전류계산" 전기학회 논문지 제33권 제11호 pp.447-455, 1984.11