

確率的 故障電流 解析에 의한 遮斷器 容量 選定

Selection of Capacity of Circuit Breaker by Probabilistic Short-Circuit Current Analysis

文 永 鉉* · 吳 龍 澤**
(Young-Hyun Moon · Yong-Taek Oh)

요 약

본 논문에서는 전력계에 발생할 수 있는 3상단락 고장전류 계산에 있어서 등가 임피던스를 효율적으로 계산하는 알고리즘을 제시하고, 확률적으로 고장전류 분포를 해석하여 차단기 용량을 선정하는 방법을 제시한다. 즉, 고장점에 따른 모선 어드미턴스 변화분을 계산 하므로써 고장등가 임피던스를 계산하고 특정선로의 고장점을 변화시키며 3상단락 고장전류의 확률적 분포를 해석하여 적정용량의 차단기를 선정하는 방법을 제시하였다. 제시한 알고리즘으로 IEEE-6 모선 계통과 IEEE-30모선 계통에 적용하여 효용성을 입증하였고 확률적 고장전류 해석 방법은 적정 차단기 용량을 선정함으로써 설비 투자비면에서 경제적임을 입증하였다.

Abstract- This paper presents an algorithm that can compute equivalent impedance effectively in computing 3-phase short circuit current which would be generated in power systems. Also this paper proposes a method that can decide the capacity of circuit breaker by analysing the fault current distribution probabilistically when the fault point of specified line varies. The efficiency of the algorithm was verified by applying the proposed method to IEEE-6bus system and IEEE-30bus system, and probabilistic fault analysing method is verified economic in facility investment by deciding the proper capacity of circuit breaker.

1. 서 론

전력계통의 운전과 설계에는 계통의 복잡성때문

에 고장에 대한 적절한 보호대책을 수립하여야 한다. 이때 고장전류 해석은 보호계통 계획시 보호 계전기 정정, 차단기 용량 결정등에 기본이된다. 특히 최근에 관심이 되고 있는 확률적 고장전류 해석 방법을 적용하면 차단기 용량 계획시 설비 투자비면에서 경제적일 수 있다.

고장전류 해석방법은 고장전류 계산에 필요한 등가임피던스를 계산하는 방법으로서 모선임피던

*正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

**正 會 員 : 韓國電公社力電子計算所 課長 · 工博

接受日字 : 1988年 8月 11日

1次修正 : 1988年 9月 28日

2次修正 : 1988年 10月 29日

3次修正 : 1989年 10月 21日

스를 직접 구하는 방법[1, 2]이 있으나 알고리즘이 복잡하여 모선 임피던스 계산에 많은 계산시간이 소요되며 모선임피던스 계산에 큰 기억용량을 필요로 한다. 가우스 소거법을 이용한 모선어드미턴스 계산방법은[3, 4] 간단한 반면 가우스 소거법에 많은 계산시간이 소요된다. 한편 확률적 해석방법을 전력 계통에 적용한 것은 거리 계전기를 사용하여 고정제거 시간의 확률밀도 함수를 계산함으로써 보호계통 모델 구성방법을 Billington[5]이 제시하였으며, El-kady[6, 7]는 확률적 해석방법인 몬테카를로 난수 시뮬레이션으로 고장전류를 해석하였다.

본 논문에서는 모선 및 선로사고에서 거리에 따른 3상단락 고장전류를 고장에 따른 모선어드미턴스분을 분해하여 계산하는 알고리즘을 제시하였고 3상단락 고장전류를 확률적 방법으로 해석하여 차단기 용량을 선정하는 효과적인 알고리즘을 제시하였다.

이 방법을 IEEE-6 모선 계통과 IEEE-30모선 계통에 적용하여 제시한 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

2. ΔY bus분해법에 의한 등가임피던스 계산

고장전류 계산에서 등가임피던스 구성방법은 행렬 구성이 쉽고 비영요소의 스파시티를 최대한 이용할 수 있는 모선어드미턴스 방법을 채용하여 최적삼각 인수법[8]을 이용하므로써 등가임피던스를 계산한다.

그림 1에서와 같이 상호결합된 선로의 3상단락 사고에 대한 고장점으로 부터의 등가임피던스를 계산한다.

여기서 k 는 선로에 고장이 발생한 지점이고 r 은 고장위치를 %거리로 나타내며 모선과 고장점의 선로 임피던스는 거리에 비례하는 것으로 가정한다.

그림과 같은 선로사고는 지로와 링크가 동시에

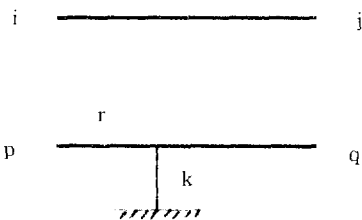


그림 1 선로 단락사고
Fig. 1 Line Short Fault

추가 되므로 변화된 계통에 대해서는 지로의 링크의 동시 추가과정으로 해석할 수 있다. 따라서 고장전의 계통에 대한 원시 어드미턴스와 원시 임피던스 행렬의 관계식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} Z_0^R & Z_{0a} \\ Z_{a0} & Z_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0^R & y_{0a} \\ y_{a0} & y_{aa} \end{bmatrix} = I \quad (1)$$

단,

Z_0^R, y_0^R ; 고장선로를 제외한 원시임피던스 행렬과 원시어드미턴스 행렬

Z_{0a}^R, y_{0a} ; 기존의 선로와 고장선로간 상호 결합 임피던스와 결합어드미턴스

Z_{aa}, y_{aa} ; 고장선로의 선로 임피던스와 선로 어드미턴스

I ; 단위 행렬

선로에 고장점을 추가하였을 경우 원시 임피던스의 관계식은 아래와 같다.

$$Z_{prim} = \begin{bmatrix} Z_0^R & Z_{0a}(r \ 1-r) \\ \begin{bmatrix} r \\ 1-r \end{bmatrix} Z_{a0} & Z_{aa} \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & 1-r \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2)$$

원시 어드미턴스는 원시 임피던스와의 역행렬 관계식을 이용하여 계산하면 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$y_{prim} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$y_{11} = [Z_0^R - Z_{aa}^{-1} Z_{0a} Z_{a0}]^{-1}$$

$$y_{21} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} y_{a0}$$

$$y_{22} = Z_{aa}^{-1} \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & 1-r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} [y_{aa} + Z_{aa}]^{-1} [1 \ 1]$$

$$y_{12} = y_{21} \text{의 전치행렬}$$

고장점의 연결 관계를 고려하여 노드 p 에서 고장점 k 까지는 지로 추가하고, 고장점 노드 k 에서 q 까지는 링크 추가하여 추가된 회로의 접속 행렬을 구성하면 식 (4)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} K_0^R & K \\ 0 & J \end{bmatrix} \quad (4)$$

단,

A_0^R ; 고장선로를 제외한 접속행렬

$$K : \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$J : [-1, \ 1]$$

여기서 k 는 고장선로 모선 p 와 q 에서 고장점 k

의 연결관계를 보여주는 행렬이다. 구성한 접속 행렬식과 (4) 식을 이용하면 모션 머드미턴스를 계산할 수 있다.

$$Y_{bus} = [A] [y_{prim}] [A]^T \quad (5)$$

이 과정으로 구해진 고장후의 모션 어드미턴스는 아래식과 같다.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{bus}^{(0)} + Pd^{-1}p^T & p \\ p^T & d \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 고장에 따른 모션 어드미턴스 변화분을 쉽게 계산되며 결과식은 아래와 같다.

$$p = Z_{aa}^{-1} K \begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \\ 1/(1-r) \end{bmatrix}$$

$$d = Z_{aa}^{-1}/r(1-r) \quad (7)$$

$$Y_{bus}^{(0)} = A_0^R y_0^R A_0^R A_0^{Rt}$$

식 (6)에서 구해진 고장후의 모션 어드미턴스 행렬에서 단위 행렬의 관계를 이용하여 고장후의 등가 임피던스 Z_{bus} 를 계산하면 아래식과 같다.

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_o & Z_{pk} \\ Z_{kp} & Z_{kk} \end{bmatrix} \quad (8)$$

단,

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

$$Z_{pk} = (1-r)Z_{bus}^{(0)} + rZ_{bus}^{(0)}_{pq}$$

$$Z_{kk} = r(1-r)Z_{aa} + (1-r)^2 Z_{bus}^{(0)}_{pp} + r(1-r)Z_{bus}^{(0)}_{qp} + r(1-r)Z_{bus}^{(0)}_{pq} + r^2 Z_{bus}^{(0)}_{qq}$$

이상과 같이 구한 결과식에서 고장점에 등가 임피던스 Z_{kk} 는 삼각 인수포에서 해당값을 쉽게 계산할 수 있고 계산한 유도식의 과정은 Han[4] 이 제시한 결과값과 동일 하였으며 본 알고리즘 유도 과정의 효용성은 효과적으로 접근한 바가 있다. [10]

3. 확률적 3상단락 고장전류 해석

전력계통의 확률적 고장해석은 무작위 고장조건 뿐만 아니라 부하변동, 고장요소, 선로정수등 경험으로 고려중에 있는 특정 모션이나 선로에 고장전류의 확률적 분포를 제공한다.

3상단락 고장전류 해석은 단락사고중 가장 심각한 사고이므로 차단기 용량을 선정하는데 반드시 고려하여야 하는 중요한 고장형태이다.

본 논문에서는 고려중인 특정모션에 차단기를

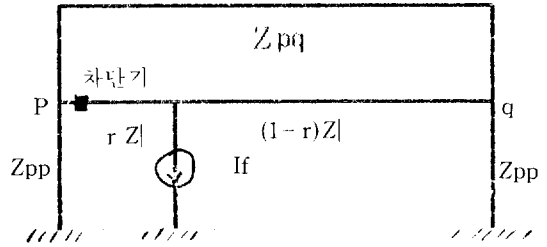


그림 2 지락사고 등가회로
Fig. 2 Short Faulted equivalent network

선정하기 위해 선로의 고장점에 따른 고장전류의 분포를 계산하고, 차단기에 흐르는 고장전류의 근사식으로서 차단기 용량 설정방법을 제시한다.

특정선로에 3상단락 사고를 가정하여 계통을 그림 2와 같이 등가회로로 구성할 수 있다.

상기그림에서 p 모션에 차단기를 설치하고자 하며, Z_{pq} 는 고장모선의 상호등가 임피던스이고 Z_{pp} 와 Z_{qq} 는 각각 고장모선의 자기 등가 임피던스이다. I_f 는 고장점의 고장전류이며, Z_1 은 고장선로의 선로 임피던스이고 r 은 고장점의 거리를 (%)로 나타낸 것이다.

등가회로에서 차단기에 흐르는 고장전류는 식 (8)에서 유도한 고장점 등가 임피던스를 대입하여 유도하면 아래식과 같이 근사식으로 계산된다.

$$(Ar^2 + Br + C)I_{fb}(r) = (1-r) \quad (9)$$

단

$$A = Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} - Z_1$$

$$B = Z_1 + 2Z_{pq} - 2Z_{pp}$$

$$C = Z_{pp} + Z_k$$

$I_{fb}(r)$: 차단기에 흐르는 고장전류

Z_k : 고장점 임피던스 정상분

고장선로의 고장발생 빈도수는 모션 가까이는 적을 수 있으나 이론상의 전개를 간단히 하기 위해 빈도확률은 동일하게 전 선로에 발생한다고 가정한다. 고로, 실제적으로 고려하려는 확률밀도 함수는 아래식과 같이 유도할 수 있다. [11]

$$f\hat{I}_{fb}(I_{fb}) = |-(B+2A)/D^{\frac{1}{2}} - 1/(2ADI_{fb})| \quad (10)$$

단,

$$D = (B^2 - 4AC)I_{fb}^2 + 2(B+2A)I_{fb} + 1$$

차단기에 흐르는 고장전류의 크기에 따라 고려 중인 선로에서 고장이 발생하는 확률은 식 (10)을 적분하므로써 아래식과 같이 계산할 수 있다.

$$P(I_{fb} < \hat{I}_{fb} < I_{fb} + \Delta I_{fb}) = \int_{I_{fb}}^{I_{fb} + \Delta I_{fb}} f\hat{I}_{fb}(I_{fb}) dI_{fb} \quad (11)$$

4. 계통적용 사례연구

본 연구에서는 그림 3과 같은 IEEE-6 모선 계통에서 고장전류 크기에 따른 차단기 파괴 확률을 수치적으로 적용한다.

계통의 DATA는 IEEE-6모선 자료[1]를 참조하였으며, 모선 ①에서 모선 ④까지의 (%) 거리를 변화시키면서 고장점의 임피던스를 0.05+j0.01로 가정하여 차단기에 흐르는 3상 단락고장 전류를 계산하면 분포곡선은 그림 4와 같다.

세시한 알고리즘으로 고장전류의 크기에 따라 고장이 발생하는 확률로서 차단기가 파괴되는 확률을 계산한다. 여기서 차단기의 단락용량을 초과

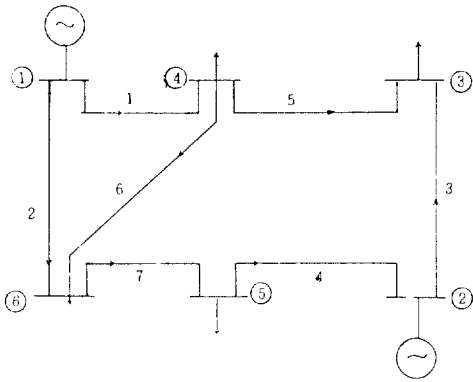


그림 3 IEEE-6 모선 계통
Fig. 3 IEEE-6 Bus System

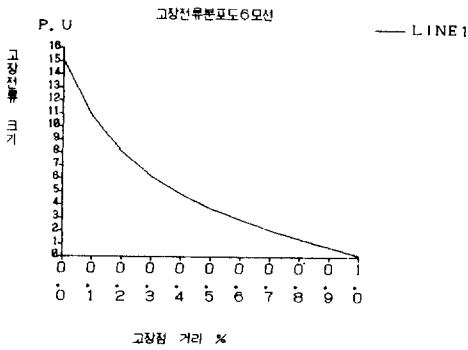


그림 4 거리 r에 따른 고장전류 곡선(IEEE-6 모선)
Fig. 4 Curve of Fault Current for Distance [r] (IEEE-6 Bus)

하는 고장전류가 흐르면 차단기는 반드시 파괴된다고 가정한다. 선정된 차단기가 파괴될 확률은 표 1과 같다.

상기표에서 보는 바와 같이 16(P.U) 이상의 용량을 선정하면 차단기를 파괴되지 않으나 투자비면에서 최적의용량이라고 할 수는 없다. 여기에 감가상각비등의 운용비를 고려하여 최적의 용량을 선정하는 것이 경제적인 수 있다.

실제적으로 그림 5와 같은 IEEE-30모선 모델계

표 1 차단기 파괴확률 (IEEE-6 모선)
Table 1 Probability of break to Circuit Breaker

차단기 용량[P.U]	15.6	14	13	12
파괴 확률[%]	0	0.645	1.63	2.98

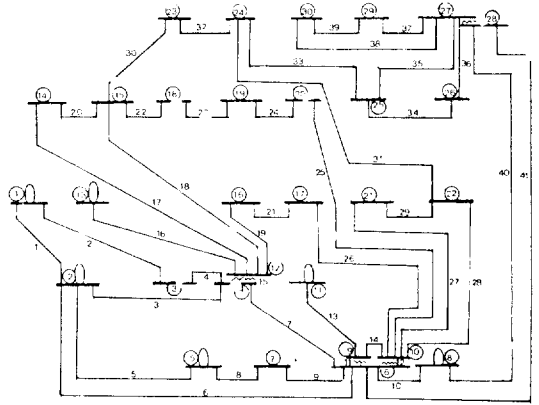


그림 5 IEEE-30모선 계통
Fig. 5 IEEE-30 Bus System

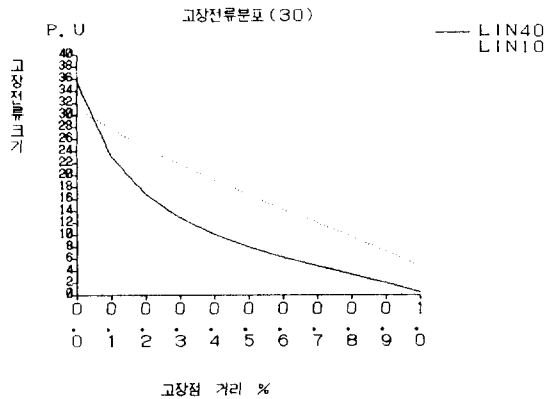


그림 6 거리(r)에 따른 고장전류 곡선(IEEE-30 모선)
Fig. 6 Curve of Fault Current for Distance [r] (IEEE-30Bus)

표 2 차단기 용량별 연간 총비용
Table 2 Annual Cost for Capacity of Circuit Breaker

차단기용량	감가상각비	차단기파괴시 손실기대치	연간 총비용
50KA	2167만원	0원	2167만원
31.5KA	1500만원	38만원/171만원	1538만원/1671만원

통에서 제시한 알고리즘을 적용하여 선로 40과 선로 10에서 고장전류를 계산하고 현재의 차단기 규격과 투자비를 적용하여 경제성을 검토한다. 계통의 자료는 IEEE-30 모선 계통의 자료를 [1, 10] 참조하며 차단기 규격과 투자비는 현재에 사용되는 유사한 자료를 참조하였다.

선로 40에서 모선 8의 차단기 용량을 설계하는 것으로 가정하고 선로 10에서 모선 6의 차단기 용량을 선정하는 것으로 가정한다. 각각의 고장점 임피던스는 $0.05 + j0.01$ 과 $0.01 + j0.01$ 로 가정할 때 3상 단락 고장전류의 변환곡선은 그림 6으로 보여진다.

고장전류의 크기는 161(kv) 250(MVA)를 기준으로 하여 계산하고 감가상각비는 신설후 1년이하로 가정하여 산출하였으며 내용년한은 15년으로 가정하였다. 각각의 차단기 용량별 연간 총비용을 근사적으로 산출하면 표 2와 같다.

상기표에서 보는것과 같이 연간 총비용이 적은 차단기는 31.5(KA)이다. 종래의 방법에 의하여 50(KA) 정도의 차단기를 설치하였으나 투자비면에서 비경제적일 수 있다. 계통이 커져 차단기가 많게되면, 본 논문에서 제시한 방법은 상당한 투자비 절감효과를 가져올 수 있고 특히 차단기 용량이 더욱 세분화 되어 있으며 계통 계획에 있어서 중요한 일면을 제공할 것이다.

이상과 같은 전산 시뮬레이션은 IBM-3083 COMPUTER SYSTEM에 의해 행해졌다.

5. 결 론

계통의 모선 3상 단락사고를 가장 심각한 사고로 가정하여 고장전류를 계산하고 차단기 용량을 선정한 종래의 방법은 설비 투자비면에서 경제적일 수는 없다.

본 논문에서는 고려하려는 차단기 설치 선로에 3상 단락사고를 가정하고 고장에 따른 모선 어드미턴스 변화분을 이용하여, 단락고장 전류를 효율적으로 계산하는 알고리즘을 제시하였으며, 선로의 3상 단락고장 전류의 확률적 분포를 이용하여

차단기의 용량을 선정하는 알고리즘을 제시하였다.

제안된 방법을 IEEE-6모선과 30모선계통에 적용한 결과 종래의 방법과 비교하여 고장전류를 쉽게 계산할 수 있었고, 차단기 용량 선정에서 확률적 고장전류 해석 방법은 설비 투자비면에서 경제성을 찾을 수 있었다.

부 록

모선의 차단기에 흐르는 고장전류의 근사식은 아래와 같다.

$$I_{fb(r)} = (1-r) / (Z_{kk} + Z_k) \tag{A1}$$

2항의 식 (8)에서 계산한 고장점 등가 임피던스 Z_{kk} 를 대입하면 식 (7)과 같고 거리 r 과 고장전류 I_{fb} 의 관계식으로 정리하면 아래식과 같다.

$$r = \left[- (BI_{fb} + 1) + \sqrt{(BI_{fb} + 1)^2 - 4AI_{fb}(CI_{fb} - 1)} \right] / 2I_{fb}A \tag{A2}$$

단, $0 < r < 1$ 이다.

거리 r 에 고장발생 확률은 일정하다고 가정하였으므로 고장전류 I_{fb} 로 변수변환을하면 발생 확률 밀도함수는 식 (A2)를 미분함으로서 아래식과 같다.

$$f\tilde{I}_{fb}(I_{fb}) = | - (B + 2A) / D^{3/2} - 1 / (2ADI_{fb}) | \tag{A3}$$

단

$$D = (B^2 - 4AC)I_{fb}^2 + 2(B + 2A)I_{fb} + 1$$

고장전류를 변화시킴으로서 고장이 발생할 수 있는 확률은 식 (A3)를 적분하므로써 계산한다.

$$P(I_{fb} < \hat{I}_{fb} + \Delta I_{fb}) = \int_{I_{fb}}^{I_{fb} + \Delta I_{fb}} f\tilde{I}_{fb}(I_{fb}) dI_{fb} \tag{A4}$$

참 고 문 헌

- [1] M.A. PAI; Computer Techniques in Power System Analysis, pp. 58~75, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1979.
- [2] Stagg and EI-Abiad; Computer method in Power System Analysis, Mcgraw-Hill Series in Electric Systems, 1968.
- [3] L. Roy and N.D. Rao ; "Exact Calculation of Simultaneous Faults Involving Open Conductors and Line to Ground Short Circuits on Inherently Unbalanced Power System," IEEE, vol, no. 8, pp. 2738~2746, AUG, 1982.
- [4] P.M. Anderson, D.W. Bowen and A.P. Shah ; "An Indefinite Admittance Network Description for Fault Computation," IEEE, vol, PAS-89, 1215~1219, 1970.
- [5] P.R.S. Kuruganty and R. Billington ; "Protection System Modelling in a Probablistic Assesment of Transient Stability," IEEE, vol, PAS-100, no. 5, pp. 2163~2170, MAY, 1981.
- [6] M.A. El-Kady and G.L. Ford ; "An Advanced Probabilistic Short Circuit Program," IEEE, vol, PAS-102, no. 5, pp. 1240~1248, MAY, 1983.
- [7] M.A. El-Kady ; "Probabilistic Short Circuit Analysis by Monte Carlo Simulation," ibid, PAS-102, no. 5, pp. 1308~1316, MAY, 1983.
- [8] W.F. Tinney and W. Scott Meyer ; "Solution of Large Sparce Systems by Ordered Treangular Fatorization," IEEE, Trans on Automatic Control, vol. AC-18, no. 4, pp. 333~345, AUG, 1973.
- [9] Z.X. Han ; "Generalized Method of Anaysis of Simultaneous Faults in Electric Power System," IEEE, vol, PAS-101, no. 10, pp. 3933~3942, OCT, 1982.
- [10] 박재용, 오용택, 문영현 ; " ΔY_{bus} 분해법에 의한 다중사고 고장전류 해석" 전기학회 논문지, 제37권 2호, 2월, 1988.
- [11] Papulis ; Probability, Random Variables and Stochastic Process, pp. 83~220, McGraw-Hill, KOKAKUSA, LTD, 1965.