

배전계통 유도장애 해석을 위한 불평형 선로 고장계산

류정현*, 김건중*, 임종호*, 박헌경*, 김태균*, 김용학*
 *충남대학교 전기공학과, **한전전력연구원

Unbalanced line fault study for inductive disturbance analysis of distribution system

J.H. Ryu*, K.J. Kim*, J.H. Choi*, C.H. Rhim*, H.K. Park*, T.K. Kim**, Y.H. Kim**
 *ChungNam National University, **KEPRI

Abstract - The existing short circuit analysis calculate the current with the balance system and unbalance fault impedance. That method deal with only bus fault with the consequence that line fault study is irrational. This paper propose the line fault, shunt unbalance and series unbalance analysis method using template concept that is one of advantages for OOP(Object-Oriented Programming). This method is possible to use for calculating inductive disturbance.

1. 서 론

전력 계통에 있어서 사고가 발생하면 이상전류가 흐르게 되며 이것에 의하여 계통내의 설비 파손 및 그 밖의 다른 계통에 이상전압이 발생할 뿐 만 아니라 불평형 운전에 따른 비정상 운전, 전력 수송의 중단, 동기 탈조와 같은 계통에 불안정한 요인을 제공하게 되기 때문에 안정운전을 방해하게 된다. 따라서 계통의 안정성을 확보하기 위하여 계획과 운전에서 있어서 사고가 계통에 미치는 영향과 그 대책을 고려하여야 한다.

고장 계산이란 계통에 각종 사고가 발생하였을 때 고장점 및 계통의 각 부분의 전압과 전류를 계산하는 것을 말하며 보호계전기의 정정, 차단기의 차단용량 결정, 송전선이나 변압기 등 전력 기기의 이상 전류와 이상전압을 검토하는데 널리 이용된다.

정상 상태에서의 전력 계통은 항상 삼상 발전전력과 부하가 평형 상태를 유지하면서 운전되기 때문에 삼상계통을 단상처럼 다루어 왔다. 그러나 실제로는 계통 자체가 불평형 성분을 포함하게 된다.

지금까지의 국, 내외의 상용 패키지 등은 표현이 단순하고 계산이 편리하다는 점을 이용하여 불평형된 각 상의 값을 평형 대칭 성분으로 변환해서 푸는 방법을 사용한다. 또한 빠른 계산을 위해 고장점의 테브난 임피던스와 전압을 이용하여 고장전류를 계산하였다. 하지만 테브난 등가 회로는 모선에서만 얻을 수 있는 값 이므로 그동안의 고장계산은 모선 고장만을 다루어 왔다.

본 연구에서는 테브난 회로를 고려하지 않고 시스템 전체를 직접 계산하는 방법을 이용하였다. 또한 시스템이 불평형인 경우를 모두 수용할 수 있도록 C#의 객체지향 기법을 이용하여 3상을 하나의 객체로 모델링하였고 모선고장, 선로 고장, 선로 불평형에 대한 해석 방법을 제안하고 검증하였다.

2. 본 론

본 논문에서는 기존의 고장계산 방법을 고장해석, 새로운 고장계산 방법을 불평형 회로해석이라 하였다. 불평형 회로해석은 계통 전압에 걸쳐 불평형 상태(단상선로 등)가 존재 하거나 사고가 여러종류로 여러 지점에 존재하는 경우에도 해석이 가능하다. 본 절에는 먼저 고장해석 방법을 설명하고 다음으로 불평형 해석 방법을 제시한다.

2.1 고장 해석

2.1.1 고장 해석 개요

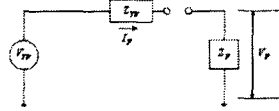


그림 1. 고장점에서 본 등가 테브난 회로

고장 해석은 고장전 시스템의 상태를 먼저 계산한 후 고장점에서 본 시스템의 테브난 등가 회로를 구하여 고장전류를 계산한다. 고장 해석 방법의 순서는 다음과 같다.

- 1) 고장전 시스템의 대칭분 회로를 만들고 어드미턴스 행렬을 구성하여 시스템 방정식을 완성한다.
- 2) 고장전 시스템의 전압을 계산한다.
- 3) 고장점의 테브난 등가 회로를 구한다.
- 4) 고장전류와 변화된 모선 전압을 계산한다.

2.1.2 시스템 방정식

3상 계통의 전압 전류 방정식은 기본적으로 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_a & & & & \\ & Y_b & & & \\ & & Y_c & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

고장해석에서는 속도 개선을 위해 각 대칭성분에 대해 따로 행렬을 구성하여 계산한다. 하지만 객체지향 기법을 사용하면 벡터와 행렬의 각 요소를 3차 벡터와 3by3 행렬을 이용하여 표현하므로 Sparse행렬의 search속도에는 영향이 없고 연산양만 3배 증가한다. 따라서 계산속도는 3배 정도 소요되지만 아주 적은 시간 이므로 무시가 가능하다.

2.1.3 시스템 상태 계산

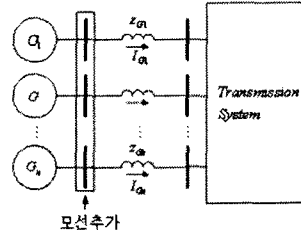


그림 2. 시스템 상태 계산을 위한 모선 추가

시스템을 해석하기 위해 먼저 정상 상태의 전압을 계산해야 한다. 시스템에 입력되는 전력과 전압이 주어지

지만 이는 발전기 내부 임피던스 이후의 값이다. 따라서 발전기 내부 임피던스를 고려하기 위해 그림2와 같이 모선을 추가한다.

추가된 모선의 전류를 I_M , 기타 모선의 전류를 KCL에 의해 0이라 하면 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{MM} & Y_{MN} \\ Y_{NM} & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_M \\ V_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_{MM} &= \text{diag}(Y_G) \\ Y_{NM} &= -1gA_G g_{NM} \\ Y_{MN} &= Y_{NM}^T = -1g_{NM}^T g_{AM}^T \\ \text{단, } Y_{NN} &= Y_{BUS} + A_G g_{NM} g_{AM}^T \end{aligned} \quad \begin{aligned} E_N &: \text{발전단자 전압} \\ V_N &: \text{발전모선 전압} \\ A_G(\text{발전기 접속행렬}) &= R^{**}, \begin{cases} m: \text{모선 수} \\ n: \text{발전기 수} \end{cases} \end{aligned}$$

식 (2)을 V_N 에 대하여 정리하면 모선 전압은 다음과 같다.

$$V_{Bus} = V_N = Y_{NN}^{-1} g_{AM}^T g_{NM}, \quad I_M = \left(\frac{S}{V_G} \right)^* \quad (3)$$

2.1.4 Thevenin 임피던스

계통 방정식을 이용하여 Thevenin 임피던스를 결정하는 방법을 알아보자. 먼저 식 (1)의 역행렬을 구하여 임피던스 행렬을 계산한다. 그런 후에 Thevenin 임피던스를 구할 모선에만 전류 ΔI 를 주입하면

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ M \\ \Delta V_k \\ M \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & L & Z_{1k} & L & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & L & Z_{2k} & L & Z_{2n} \\ M & M & O & M & O & M \\ Z_{k1} & Z_{k2} & L & Z_{kk} & L & Z_{kn} \\ M & M & O & M & O & M \\ Z_{n1} & Z_{n2} & L & Z_{nk} & L & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ \Delta I_k \\ M \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 주어진다. 이 식을 계산한 결과는

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ M \\ \Delta V_k \\ M \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ M \\ Z_{kk} \\ M \\ Z_{nk} \end{bmatrix} \Delta I_k \quad (5)$$

로 얻어진다. k모선의 Thevenin 임피던스는 k모선 주입 전류와 k모선의 전압의 비 이므로 위 식에서

$$Z_T = \frac{\Delta V_k}{\Delta I_k} = Z_{kk} \quad (6)$$

를 얻을 수 있다.

2.1.4 고장 계산

고장점의 시스템 Thevenin 임피던스와 고장 임피던스를 이용하여 고장 전류를 계산한다.

$$I_F = (Z_{Th} + Z_F)^{-1} g_{V_{Th}} \quad (7)$$

사고가 나지 않은 다른 모선의 전압을 구하는 방법은 회로에서의 중첩의 원리(Superposition principle)를 이용한 것이다. 앞에서 구한 고장 전류를 시스템의 전류원으로 인가하고 발전기는 단락하여 시스템을 구성한다.

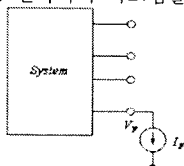


그림 3. 전류원으로 나타낸 고장전류

전류가 시스템 밖으로 나가는 방향이므로 시스템의 전압 변화는 다음과 같다.

$$\Delta I_{Bus} = \begin{bmatrix} 0 \\ M \\ -I_F \\ M \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta V_{Bus} = Y_{Bus}^{-1} g \Delta I_{Bus}$$

이제 시스템의 초기 전압에 위의 결과를 더해주면 최종 전압을 계산 할 수 있다.

$$V = V_{init} + \Delta V \quad (9)$$

2.1.5 계산 순서도

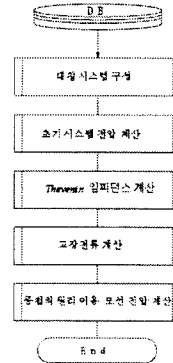


그림 4. 고장해석 순서도

2.2 불평형 회로 해석

2.2.1 불평형 회로 해석 개요

불평형 회로 해석은 평형 대칭 시스템에 Series Unbalance(선로 불평형 고장), Shunt Unbalance(지락, 단락고장)을 입력한 후 시스템 전체를 직접 계산하는 방식이다. 불평형 회로 해석 방법의 순서는 다음과 같다.

- 1) 고장전 시스템을 대칭성분으로 만든다.
- 2) Series Unbalance 상태를 입력한다.
- 3) 어드미턴스 행렬을 구성한다. (고장해석과 동일)
- 4) Shunt Unbalance 상태를 입력한다.
- 5) 시스템의 전압, 전류를 계산한다.

2.2.2 Series Unbalance 모델

3상 시스템에서 선로 개방, 단일 선로 등은 시스템에 직렬 성분으로 삽입된다. 따라서 이러한 고장을 Series Unbalance라 한다.

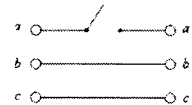


그림 5. 선로 불평형

시스템 어드미턴스 행렬의 Series 불평형이 발생한 곳의 성분을 다음과 같이 변환한다.

- 1) Symmetrical admittance Matrix를 Non-Symmetrical Impedance Matrix로 변환한다.
- 2) 각 상의 임피던스를 변경하여 상 불평형 데이터를 입력한다.
- 3) 변경된 데이터를 Symmetrical admittance Matrix로 변환한다.
- 4) Symmetrical 데이터를 이용하여 YBus행렬을

구성한다.

☞ 선로 Open : 해당 상태에 Infinite를 입력

$$\begin{bmatrix} Y_{00} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Z_s & Z_{ms} & Z_{ms} \\ Z_{ms} & Z_s & Z_{ms} \\ Z_{ms} & Z_{ms} & Z_s \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \infty & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & Z_{ms} \\ 0 & Z_{ms} & Z_s \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} & Y_{02} \\ Y_{10} & Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{20} & Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.3 Shunt Unbalance 모델

지락, 단락고장은 시스템에 병렬 회로가 삽입되는 경우이다. 따라서 이러한 고장을 Shunt Unbalance라 한다.

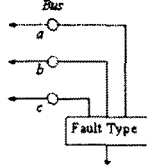


그림 6. Shunt 불평형

Shunt불평형은 모선에 발생한 것으로 간주한다. 시스템 어드미턴스 행렬의 해당 모선 위치에 고장 어드미턴스 행렬을 더한다.

$$Y_{Bus} = Y_{Bus} + Y_F = \begin{bmatrix} Y_{B00} & Y_{B01} & Y_{B02} \\ Y_{B10} & Y_{B11} & Y_{B12} \\ Y_{B20} & Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{F00} & Y_{F01} & Y_{F02} \\ Y_{F10} & Y_{F11} & Y_{F12} \\ Y_{F20} & Y_{F21} & Y_{F22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2.4 선로 중간의 Simultaneous Unbalance

선로 중간에 고장 발생시 적절한 해석 모델이 필요하다. 첫 번째 고려 방법은 고장 선로를 해당 모선의 Shunt성분으로 고려하는 것이고, 두 번째 방법은 고장점에 모선을 추가하는 방법이며 최종적으로 두 번째 방법을 선택하였다.

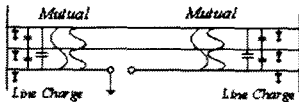


그림 7. 실제 계통 상태

1) Shunt성분으로 고려 방법

실제 선로 중간에 고장이 발생했을 경우 선로에는 그림 7과 같은 Line Charge 성분과, Mutual 임피던스 성분 등이 존재한다. 이러한 상태를 모델링 하기 위해 Series Unbalance와 비교하면 고장 선로와 관련된 성분들을 추가해야 한다.

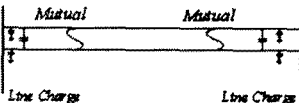


그림 8. 선로 Open시 Series Unbalance 모델

그림 9와 같이 Shunt성분으로 고장 선로 임피던스와 Line Charge를 고려한다. 이 경우 고장 선로와 비 고장 선로간의 상호 임피던스는 고려하지 못한다.

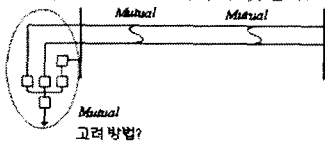


그림 9. Simultaneous Unbalance 모델

2) 모선 추가 방법

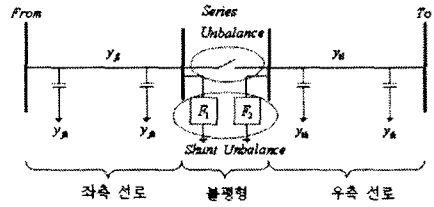


그림 10. 고장점에 모선 추가

선로의 Mutual 임피던스를 고려하기 위해 위와 같이 고장점에 모선 2개를 추가한다. 추가한 모선 사이의 선로 임피던스는 0이고 Series 불평형의 상태에 따라서 값을 변경한다. Shunt 불평형은 고장점의 좌측과 우측에 모두 고려하여 입력한다. 고장점을 기준으로 좌우측의 Line Charge와 임피던스를 분배한다. 위의 회로에 대해 각 파라미터 값이 결정되면 모선축약을 통해 From모선과 To 모선 사이의 방정식을 얻을 수 있다.

2.2.5 시스템 전압 전류 계산

시스템 방정식이 구성되면 고장해석 방법의 고장 전 시스템 전압 계산과 동일하게 계통전압을 계산한다. 각 설비의 전류는 설비의 단자 전압을 이용하여 계산하며 Shunt unbalance전류는 그림 11과 같이 각 설비에 흐르는 전류의 합으로 계산한다. Series Unbalance는 설비와 마찬가지로 단자 사이의 전압을 이용하여 계산한다.

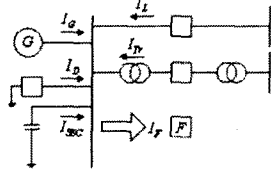


그림 11. Shunt 불평형 전류

$$I_F = I_G + I_{Line} + I_{Tr} + I_{Load} + I_{SSC} + I_{Shunt} \quad (12)$$

2.2.6 계산 순서도

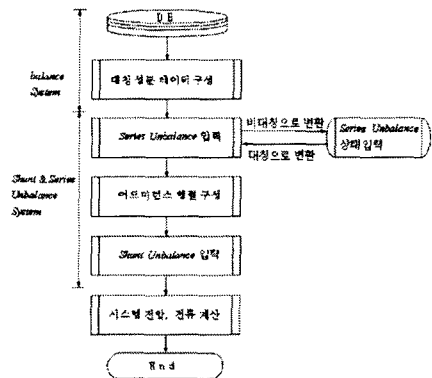


그림 12. 불평형 회로 해석 순서도

3. 사례 연구

3.1 2모선 예제

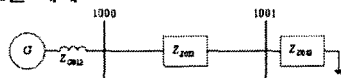


그림 13. 2모선 계통

◆ 입력 데이터

베이스 전력[MVA] : 100

선로	From	To	정,역상 임피던스[p.u]	영상 임피던스[p.u]
1000	1001		0.01+j0.6	0.01+j0.3
발전기	모선	발전 전력[MVA]	정,역상 임피던스[p.u]	영상 임피던스[p.u]
1000	1200+j360		0.01+j0.6	0.01+j0.3
부하	모선	전력 부하[MVA]	전류 부하[MVA]	어드미턴스 부하[MVA]
1001	600-j54.792		868.34+j260.502	837.794-j260.502

표 1. 입력 데이터

◆ 계산 결과

BusNum	PSS/E		PSS/E(선로제거)		Simultaneous Unbalance (Shunt&Series)					
	1 L-G(a상)		1 L-G(a상)		A Phase Open & A Phase Ground					
	Mag	Ang	Mag	Ang	a Mag	a Ang	b Mag	b Ang	c Mag	c Ang
1000	4626.5	-68.37	5890.3	-61.54	5890.3	-61.54	0	0	0	0
1001	2055.1	-99.7	0	0	2500.1	154.82	0	0	0	0

표 2. PSS/E와 Simultaneous Unbalance 계산 결과

Line	From : 1000	To : 1001	ICKT : 1
Simultaneous Unbalance (Line Fault)	From Side Fault Type	Phase Open Type	To Side Fault Type
	ALG	Aopen	Non
Position	0		0.2
Phase	a b c	a b c	
From Fault	6329.7∠-62.18	0∠0 0∠0	5584.9∠-61.70 0∠0 0∠0
To Fault	0∠0 0∠0 0∠0	0∠0	0∠0 0∠0 0∠0
Position	0.65		1
Phase	a b c	a b c	
From Fault	4460.7∠-61.04	0∠0 0∠0	3894.1∠-60.80 0∠0 0∠0
To Fault	0∠0 0∠0 0∠0	0∠0	0∠0 0∠0 0∠0

표 3. Line Fault 계산 결과

선로 고장(Line Fault)에서 Position은 from측 모선에서 To측 모선까지의 길이를 1로 했을 때 위치이다. Shunt 고장은 고장점을 기준으로 From측과 To측에 입력된다. 본 예제에서는 선로가 단선되면서 From측의 선로가 지락된 경우이다. 위 결과 고장점이 To측 선로에 가까워짐에 따라 고장 전류가 감소함을 알 수 있다.

결과 검증을 위해 PSS/E와 비교결과를 예시하였다. 1000모선에 지락고장 발생 시 4626.5A의 고장전류가 발생한다. Simultaneous(Shunt&Series) Unbalance의 경우는 5890.3A의 전류가 흐른다. 이런 차이의 원인은 b,c상의 전류가 부하를 거쳐 a선로를 통해 고장점으로 흘러들어 발전기에서 공급하는 전류와 중첩이 되기 때문이다. Simultaneous(Shunt&Series : a상 선로 제거)의 경우 PSS/E에서 선로를 모두 제거한 결과와 값이 동일하다. 이것은 예상 결과와 일치하는 값이다.

Line Fault의 경우는 좀더 큰 6329.7A의 전류가 흐른다. 이는 Simultaneous(Shunt&Series)에서는 제거했던 선로 Line Charge에 의해 부하 전류가 흐르기 때문에 고장점에서 중첩이되어 더 큰 전류가 흐른다.

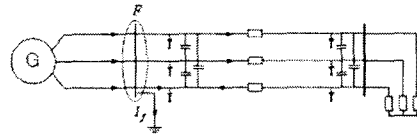


그림 14. PSS/E 고장 전류

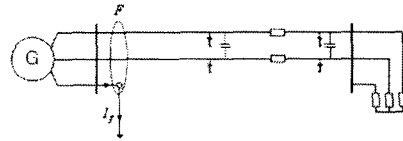


그림 15. Simultaneous Unbalance(Shunt&Series) 고장 전류

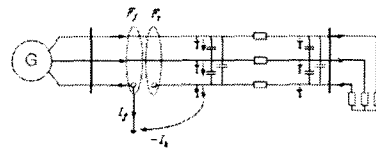


그림 16. Line Fault 고장 전류

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 고장계산 데이터를 그대로 이용하고 선로 불평형 상태 및 고장상태를 추가 데이터로 입력하여 다양한 상태의 선로 불평형 및 고장계산을 수행할 수 있도록 하였고 PSS/E와의 비교를 통하여 검증하였다. 실제통에 적용하여 동일조건(모선고장)에서는 PSS/E와 동일한 결과를 얻었고 선로 고장에 대해서 예상한 결과를 얻어 불평형 회로 계산 방법을 검증하였다. 이론적으로만 제시하고 있는 Shunt, Series, Simultaneous Unbalance에 대해 프로그래밍을 통해 직접 구현 가능한 방법과 선로 고장계산 방법을 제시함으로써 고장계산 기법의 보다 폭넓은 응용이 가능하도록 하였다. 본 연구는 배전계통 상시 유도장해 해석을 위해 계통상태를 분석하기 위한 것으로서 배전계통에 존재하는 단상 선로를 고려함이 주목적이다. 단상 선로는 Series Unbalance로 고려하여 두개의 상 임피던스 값을 무한대로 입력하면 표현이 가능함을 알 수 있다. 배전계통 해석을 위해서는 단상 선로 이외에도 단상 변압기 등 불평형 설비의 고려방법이 연구되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] J. A. Brandao Faria, "Onthe Modal Analysis of Asymmetrical three-phase transmission lines using standard transformation matrices", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No4 October 1997
 [2] Hadi Saaddat, "Power System Analysis"
 [3] 장경철, "템플릿을 이용한 고장계산 모델링", 2000
 [4] 한현규, "삼상고장계산", 2001
 [5] J.Lewis Blackburn, "Symmetrical Components for Power System Engineering"