배전자동화시스템에서 단말장치의 고장표시 정보 생성 알고리즘 개선 방법

論 文
56-4-3

An Improved Method of Faulted Section Identification Algorithm in Distribution Automation System

林 一 亨* · 林 星 日** · 崔 勉 松† · 李 承 宰*** · 權 成 鐵§ · 申 昌 勳§ · 河 福 男§§
(Il Hyung Lim · Seong-Il Lim · Myeon Song Choi · Seung Jae Lee · Sung Chul Kwon · Chang Hoon Shin · Bok Nam Ha)

Abstract - This paper proposes an improved fault indication algorithm in a distribution automation system. A conventional fault indication method, so called YES-NO algorithm, could generate wrong informations under certain conditions such as line to ground fault, large motor double circuit line. In order to prevent mal-operation of fault indicator, direction of fault current are used as well as magnitude. The feasibility of the proposed algorithm has been testified by computer simulation using Matlab power system toolbox.

Key Words : 배전자동화, 고장표시, Fault Indicator, FI, FRTU, 고장전류

1. 서 론

국내 배전자동화 시스템은 전력계통 운영기술과 IT 기술을 이용하여 원거리에 산재해 있는 배전선로용 자동화 개폐기와 물리적으로 연결 설치되어 있는 배전자동화용 단말장치(FRTU : Feeder Remote Terminal Unit)에 원격으로 감시하거나 제어하는 명령을 내린다. 또한 고장을 자동인지하고 고장구간을 자동 판단하며, 전압, 전류, 고장파형 등의 선로 운전 정보를 자동으로 수집하여 배전계통을 효율적으로 운영할 수 있도록 지원하는 종합제어 시스템이다.[1]

배전계통은 수용가와 직접 연결되어 있기 때문에 배전계통을 운영하는데 있어서 전력공급의 신뢰도는 가장 중요한 개념 중의 하나이다. 설비고장이 발생하였을 때 빨리 복구하는 것은 수용가의 정전시간을 줄여 전력공급신뢰도를 높이는 매우 중요한 요소가 된다. 따라서 수용가의 입장에서 배전자동화 시스템이 제공하는 기능 중에서 가장 유익한 기능은 빠른 정전복구기능이라고 할 수 있다.

중성점 접지방식을 사용하는 배전계통에서는 고장구간을 검출하기 위하여 'Yes-No'방식이라고 알려진 고장표시 정보 생성 알고리즘을 사용한다. 이 방법은 방사상 선로구조에서 고장점을 기준으로 하여 전원측에 설치된 단말장치들은 고장전류를 경험하고(Yes), 부하측에 설치된 단말장치들은 고장전류를 경험하지 않는다는(No)는 간단한 원리를 기반으로 한다. 즉, 보호계전기가 동작하여 고장발생이 확인되면 중앙제어장치는 고장선로에 설치된 각 단말장치의 고장표시 정보를 수집하여 고장전류를 경험한 단말장치와 고장전류를 경험하지 못한 단말장치 사이에서 고장이 발생했다고 판단한다.[2,3]

그런데 'Yes-No'방식 고장표시 알고리즘은 배전자동화 시스템의 실계통 운전에서 고장점 부하측의 고장표시도 고장전류를 경험하는 문제점이 발견되었다. 그 원인은 중부하 선로에서 1선 지락사고가 발생된 경우 고장구간 부하측에도 고장으로 판단될 크기의 영상전류가 검출되거나, 선로말단에 대용량 전동기가 있는 경우 고장시에 전동기가 발전기로 동작하여 역전력을 공급하기 때문이다. 고장표시 정보를 생성하는 고장표시기가 오동작하면 고장구간에 전력을 공급하여 충격을 주거나, 건전한 연계선로로 절체함으로서 정전구간이 확대되는 등 매우 심각한 결과를 초래한다.

배전자동화 시스템의 정전복구 기능에 관해서는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 전통적으로 경험적 탐색방법[4,5] 이나 전문가시스템[6,7] 이용되어 왔는데, 최근에는 G-net[8], 퍼지로직[9], 패트리넷[10]을 이용한 적용하거나 이를 조합한 방법[11]이 소개되고 있다. 그러나 정전복구에 대한 대부분의 연구는 고장구간이 확정된 이후에 복구해를 생성하는 알고리즘에 관한 것으로서, 실용적인 관점에서 더욱 중요한 문제점으로 대두되고 있는 고장구간을 검출에 관한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 중성점 접지 계통의 배전자동화 시스템에서 사용되는 'Yes-No'방식 고장표시기의 오동작 원인을 해석적으로 밝히고, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 영상전류와 영상전압의 위상차를 이용하는 고장표시 정보 생성 알고리즘 개선방안을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 배전자동화 시스템의 고장구간 검출방법을 설명하고 현재 사용되고 있는 고장표시 정보 생성 알고리즘의 문제점을 분석하였다. 3

* 正 會 員 : 明知大學 工大 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 明知大學 工大 電算工學科 研究教授 · 工博
† 교신저자, 終身會員 : 明知大學 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : mschoi@mju.ac.kr
*** 優待會員 : 明知大學 工大 電氣工學科 教授 · 工博
§ 正 會 員 : 韓電 電力研究院 先任研究員
§§ 正 會 員 : 韓電 電力研究院 首席研究員 · 工博
接受日字 : 2006年 12月 21日
最終完了 : 2007年 2月 24日

장에서는 영상전류와 영상전압의 위상차를 이용한 새로운 고장표시 정보 생성 알고리즘을 제안하였다. 4장에서는 본 논문에서 제시한 알고리즘의 유용성을 검증하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. 국내 배전자동화시스템

2.1 배전자동화 시스템의 구성

배전자동화 시스템의 설치 목적은 원거리에 산재하는 배전자동화 개폐기를 배전계통을 효율적으로 운영하기 위해서 중앙에서 통신을 이용하여 감시 제어하며, 고장 구간을 자동으로 검출하여 신속하게 고장을 처리하는 시스템을 구축하는 것이다.

그림 1은 배전자동화 시스템의 기본 구성을 보여주고 있다. 배전계통의 각 단위 그룹에는 중앙 제어실 내에 배전자동화(Distribution Automation System: DAS) 서버가 존재하며 DAS 서버는 각 그룹 내의 FRTU로부터 데이터를 수집하고 필요한 제어 정보를 FRTU에 전송한다.

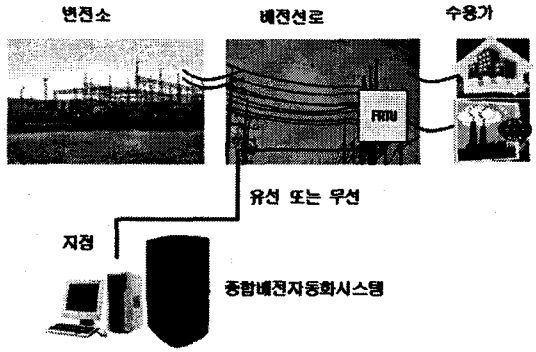


그림 1 배전자동화 시스템의 기본 구성
Fig. 1 Structure of a distribution automation system

2.2 배전자동화 시스템의 복구 서비스

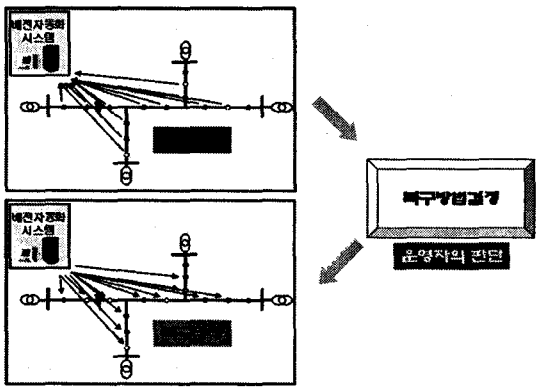


그림 2 배전자동화 시스템의 정전복구
Fig. 2 Procedure of service restoration in DAS

복구서비스는 배전자동화 시스템에 있어서 가장 중요한 서비스로 불필요 정전 구간을 복구하여 고장구간을 최소화시켜주는 서비스이다. 현재의 복구 서비스는 사고 발생 시 사고와 관련하여 모든 FRTU로부터 취득한 정보를 중앙 서버가 수집하고 이를 분석하여 고장 위치를 판단한다. 그러면 운영자나 시스템이 복구대상 정전구간을 연계선로로 절체하여 정전을 복구하는 해를 구하고, 복구해에 따라, 필요한 구간의 자동화 개폐기 조작하여 정전을 복구한다.

따라서 이러한 정전복구 기능을 수행하기 위해서 가장 중요한 것이 정확하게 고장구간을 검출해내는 것이다. 이를 위해서 FI 발생정보를 종합하여 고장구간을 검출하게 되는데 바로 이 FI 정보를 신뢰할 수 없다면 배전자동화 시스템의 정전복구 기능 또한 무용지물이 될 것이다.

2.2 배전자동화 시스템의 고장구간 파악

그림 3에서 배전자동화 시스템의 중앙장치는 배전계통의 각 단말장치로부터 수집한 정보를 가지고 계통 상태를 판단하여 적절한 단말장치의 개폐기에 대한 제어명령을 각 단말장치로 하달한다.

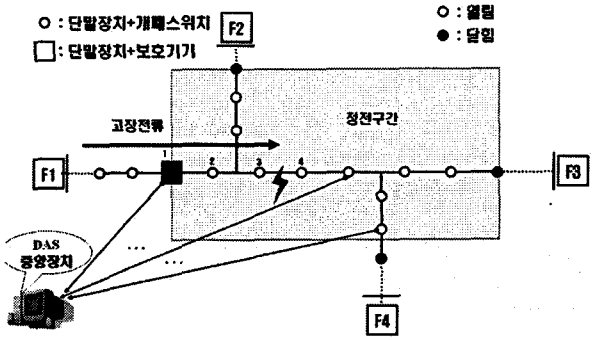


그림 3 고장표시 정보로부터 고장구간 결정
Fig. 3 Conventional faulted section identification method

그림 3에서 단말장치 3과 4사이의 구간에서 고장이 발생하면 전원으로부터 고장점까지 고장전류가 흐른다. 이때 1번에 위치한 보호기기가 동작하여 고장전류를 차단하면 그림에서와 같이 정전구간이라고 되어있는 사각형의 구간만큼 정전구간이 생성된다.

보호기기가 동작하는 사이 그림 3에서 고장전류를 일정시간만큼 경험한 1, 2, 3번은 중앙으로 고장표시 정보를 전송한다. 그러나 그 외의 단말장치들은 중앙으로 전송하는 정보에 고장표시 정보가 포함되지 않는다. 이러한 원리를 가지고 배전자동화 시스템 중앙장치는 정전구간 내의 모든 단말장치로부터 전송되는 정보를 종합하여, 고장구간을 파악한다. 그리고 고장구간을 격리하기위하여 단말장치 3과 4에 개방 명령을 하달하고, 고장구간을 제외한 정전구간을 복구하기위하여 정전구간의 각 단말장치에 적절한 개폐기 제어 명령을 하달하여 고장이 없는 정전구간을 복구한다.

2.2 현재 배전계통 단말장치의 고장표시 정보 생성방법과 문제점

배전자동화 단말장치는 변전소 전원을 기준으로 단말장치 설치점의 하위단에서 고장이 발생하면 고장전류를 감지하여

일정시간동안 지속되면 고장표시 정보를 생성하고, 중앙장치로 고장표시 정보를 전송하여 중앙장치가 고장구간을 파악할 수 있게 한다.

현재 배전계통 단말장치는 사고 시에 그림 4의 등가회로와 같이 전원단에서 고장지점으로 흐르는 고장전류를, 고장점 상단에서는 경험하지만 고장점 하단에서는 경험하지 못한다는 가정을 가진다. 이러한 가정 하에 미리 설정된 최소동작전류(Minimum pick up)값 이상의 전류가 일정시간 이상 지속적으로 흐르면 고장이 발생하였다고 판단하여 고장표시 정보를 생성한다.

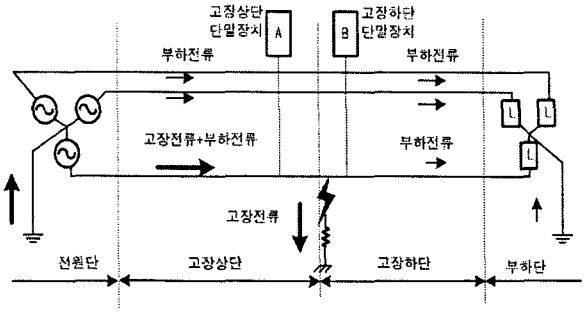


그림 4 배전계통 사고 시 등가회로
Fig. 4 Equivalence circuit of a line to ground fault

그러나 지락사고의 경우 고장구간 상위구간의 단말장치는 고장전류를 경험하여, 정확하게 고장표시 정보를 생성하는데 반하여, 부하단에서 공급되는 고장전류의 영상분이 있기 때문에 고장구간 하위의 단말장치에서도 잘못된 고장표시 정보를 생성하는 경우가 있다.

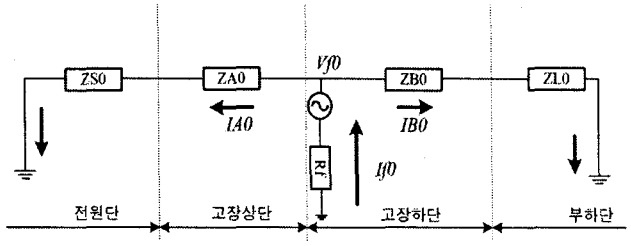


그림 5 배전계통 지락사고 시 영상회로
Fig. 5 Zero sequence circuit of a line to ground fault

그림 5는 지락고장 시 등가영상회로도이다 전원과 부하는 어느 정도 3상평형이 되었다고 가정하면 영상전압을 공급하지 않는다. 따라서 지락사고 시 3상불평형으로 인하여 고장점에 영상전압이 발생하며 이로 인하여 고장전류의 영상분이 흐른다.

고장점의 영상전압 *Vf0* 를 기준으로 하여 고장전류를 살펴보면 고장점을 중심으로 전원단과 부하단으로 고장전류의 영상분이 분기하여 흐른다. 이 때 고장점에서 부하단으로 흐르는 고장전류의 영상분이 고장점 하단의 단말장치가 잘못된 고장표시 정보를 생성하는 원인이 된다.

이와 같은 오류가 일어나는 원인은 현재의 단말장치가 전류의 크기와 지속시간만을 고려하여 고장표시 정보를 생성하기 때문이다. 그러므로 전류의 크기와 지속시간만을 고려하여 고장표시 정보를 생성하는 방법을 개선하여야 한다.

또한 부하단에 큰 전동기가 있다면 정상 시에는 부하로 작용하다가 선로에서 고장이 일어났을 때 전동기가 관성에 의하여 계속 회전하여 발전기 작용을 하게 되어 부하단에서 고장점으로 고장전류를 공급할 경우가 있다. 그리고 부하단에 분산전원이 존재하는 경우에도 마찬가지로 사고 시에 분산전원에서 고장점으로 고장전류를 공급할 경우가 있다.

그림 6은 이러한 경우의 등가회로도와 고장전류를 나타낸 것이다. 이 경우에도 고장점 하단의 단말장치가 전동기 부하단에서 공급되는 큰 고장전류로 인하여 단말장치 설치점 하단에 사고가 있다고 잘못 판단하기 때문에 고장표시 정보를 생성하는 경우가 있다.

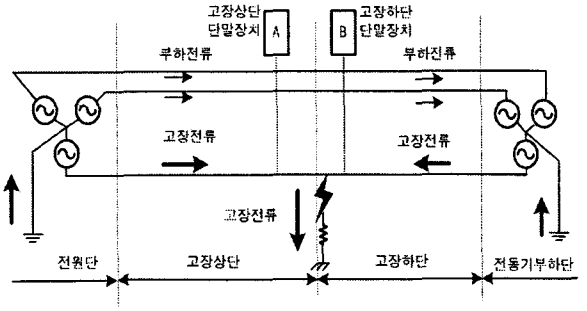


그림 6 전동기 부하를 가진 배전계통 사고 시 등가회로
Fig. 6 Line to ground fault with a large motor load

그러므로 단말장치의 고장표시 생성방법을 개선하여 부하단에서 고장점으로 고장전류를 공급할 경우에도 고장점 하단의 단말장치가 잘못된 고장표시 정보를 생성하지 않도록 새로운 방법을 고안해야 한다.

본 논문은 먼저 고장구간 양단의 전류를 분석하였으며, 이 분석을 바탕으로 단말기 설치점에서 하단의 고장유무를 판단하는 방법에 고장전류의 방향을 고려하는 과정을 추가하여 고장점 하단의 단말장치가 잘못된 고장표시 정보를 생성하지 못하도록 현재의 고장표시 생성 알고리즘을 개선하는 방법을 제안하였다.

3. 고장전류와 전압과의 위상비교에 의한 고장전류 방향판정 방법과 이를 이용한 고장정보 생성방법

3.1 지락고장시 영상전류 방향을 이용한 개선된 고장표시 정보 생성방법

지락고장 시 부하단에서 공급하는 고장전류의 영상분으로 인하여 고장구간 하단의 단말장치가 잘못된 고장표시 정보를 생성할 수가 있다. 이와 같은 오류를 방지하는 개선된 고장표시 정보 생성 방법은 그림 5에서와 같이 고장전류의 영상분은 고장점을 중심으로 고장상단과 고장점 하단에서는 반대방향으로 흐르므로 고장전류의 영상분 방향을 고려하여 고장상단에서만 고장표시 정보를 생성하게 하는 것이다.

이 개선된 방법의 원리는 고장점의 영상전압에 의하여 고장전류의 영상분이 흐르기 때문에 고장점 영상전압의 위상과 영상전류의 위상을 비교하여 고장전류의 방향을 계산하고 이를 FI 생성 시에 고려하는 것이다.

고장점에서 전원단으로 흐르는 영상전류의 크기는 전원단 영상 임피던스와 선로 영상 임피던스 합에 반비례한다. 그리고 이 영상전압과 이 전류의 위상차는 이 영상 임피던스 합의 저항과 리액턴스 비율에 의하여 결정된다. 이 임피던스는 저항이 리액턴스에 비하여 매우 작기 때문에 임피던스 평면의 1사분면의 허수축 부근에 위치할 것이다. 따라서 그림 7과 같이 고장점 상단의 임의의 측정점 영상전압 $VA0s$은 고장점의 영상전압 $Vf0$에 고장점과 측정점 사이의 선로의 전압강하를 제외한 값이 된다. 여기서 $ZA0s=RA0s+jXA0s$ 는 고장점과 측정점사이의 선로의 영상 임피던스이다. 따라서 측정점의 영상전압을 $VA0s$를 기준으로 하여 고장점에서 전원단으로 흐르는 고장전류의 영상분의 위상은 4사분면에 허축 부근에 존재한다. 그런데 단말장치에서 전원단쪽에서 부하단의 방향을 기준으로 한다면, 고장상단에서 계산된 영상전류의 위상은 기준방향과 반대이므로 2사분면에 90도 부근에 위치할 것이다.

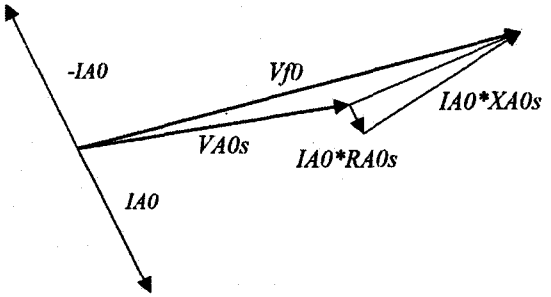


그림 7 고장점 상단의 영상전류 및 영상전압 벡터도

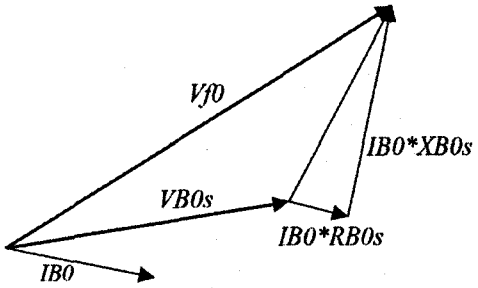
Fig. 7 Zero sequence voltage and current measured at upstream of the faulted section

마찬가지로 고장점에서 부하단으로 흐르는 영상전류의 크기는 부하의 영상 임피던스와 고장점 하단 선로와 영상 임피던스에 반비례하며, 지상부하일 때 이 임피던스는 임피던스 평면 1사분면에 위치하고, 진상부하일 때는 1사분면이나 4사분면에 위치하기도 한다.

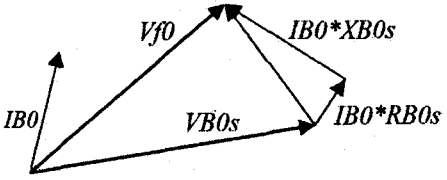
다음 그림 8은 고장점이 영상전압을 기준으로 부하단으로 흐르는 영상전류와 고장점 하단 임의의 측정점에서 영상전압간의 벡터도이다. 그림 (a)와 같이 지상부하로 인하여 고장점의 영상전압보다 지상전류가 흐를 때 이 전류의 위상은 측정점의 영상전압보다 위상이 뒤진다. 그러나 진상부하일 경우 그림 (b)와 같이 진상전류가 흘러 측정점의 영상전압보다 전류의 위상이 앞선다.

따라서 고장점 하단에 위치한 단말장치에서는 전원단에서 부하단 방향으로 흐르는 영상전류의 위상은 전류의 측정방향이 전원단에서 부하단 방향을 일 때, 영상전압의 위상을 기준으로, 4사분면이나 1사분면에 위치할 것이다.

지락사고 시에 고장점 하단에서도 부하단으로 흐르는 영상전류가 정해진 값 이상일 경우에 잘못된 고장표시 정보가 생성되는 것을 방지하려면, 기존의 영상전류의 크기와 지속시간 조건만으로 고장표시 정보를 생성하는 원리에 추가로 영상전압의 위상과 영상전류의 위상을 구하여 영상전압의 위상을 기준으로 영상전류의 위상이 2사분면의 허축 부근에 있는 경우에 한하여 고장표시 정보를 생성하도록 개선해야 한다. 이렇게 개선된 방법을 사용하면 고장점 하단에서 고장점에서 부하단으로 흐르는 영상전류가 있더라도 추가 조건이 만족되지 않기 때문에 더 이상 잘못된 고장표시 정보를 발생하지 않게 될 것이다.



(a) 진상부하 시



(b) 지상부하 시

그림 8 고장점 하단에서에서 측정한 영상전류와 영상전압의 벡터도

Fig. 8 Zero voltage and current measured at the downstream of the faulted section

3.2 부하단의 전동기를 고려한 개선된 고장표시 정보 생성 방법

부하단에 전동기가 있을 경우 선간단락고장이나 지락고장시 부하단의 전동기가 발전기 역할을 하여 부하단에서 고장점으로 큰 고장전류를 공급할 수가 있다. 이 경우 고장구간 하단의 단말장치가 잘못된 고장표시 정보를 생성한다.

이러한 오류는 고장점 상하단의 전류의 방향을 고려하여 고장점 하단의 단말장치가 잘못된 고장표시 정보를 생성하지 못하도록 개선되어야 한다.

그림 9는 지락사고나 단락사고에 관계없이 전동기 부하를 가지고 전원단이나 부하단에서 모두 정상전압을 공급하고 있는, 사고가 발생한 배전계통의 등가 정상회로도이다.

이 때 전원단의 정상전압이 고장점의 정상전압보다 커서 전원단에서 고장점으로 고장전류의 정상분이 흐른다. 마찬가지로 전동기 부하단에서 발전기 작용에 의하여 생기는 정상전압이 고장점의 정상전압보다 커서 부하단에서도 고장점으로 고장전류의 정상분을 공급한다.

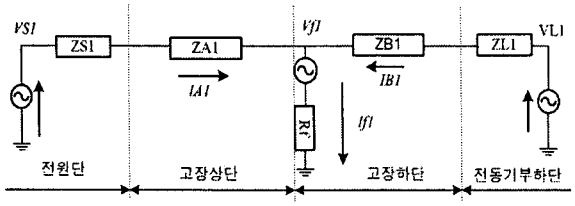


그림 9 전동기 부하를 가진 배전계통 사고 시의 정상회로도
Fig. 9 Positive sequence circuit of the line to ground fault with large motor load

그림 10은 각 정상회로의 전압과 전류의 벡터도이다. 고장점 상단에서 측정하는 정상전압 *VA1*는 전원단의 정상전압 *VS1*과 고장점의 정상전압 *Vf1*의 사이에 있기 때문에 두 전압을 연결하는 선상에 존재한다. 고장점 상단에서 측정하는 정상전압은 전원단의 정상전압과 고장점의 정상전압 사이에 존재하며 벡터도에서 이 전압의 위상각이 존재하는 영역은 그림 10의 색칠된 부분이다.

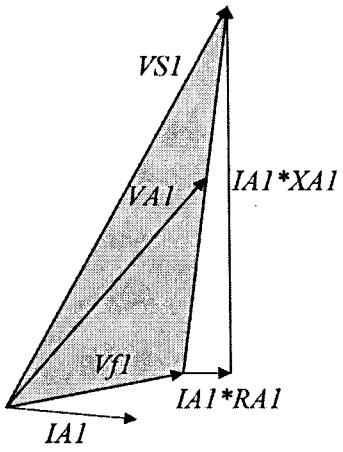


그림 10 정상회로의 각 변수 벡터도
Fig. 10 Vector diagram of positive sequence circuit of the line to ground fault with large motor load

이때 선로의 정상 임피던스는 리액턴스 부분이 크기 때문에 고장점 상단에서 측정하는 정상전류 *IA1*의 위상각은 정상전압 *VA1*의 위상각을 기준으로 4 사분면에 허수축 부분에 존재한다. 따라서 고장점 상단의 단말장치에서 전원단에서 부하단 방향을 기준으로 측정하는 전류와 전압으로부터 계산된 정상전류와 정상전압과의 위상차는 -90도 부근일 것이다. 그러나 고장점 하단의 단말장치에서 전원단에서 부하단 방향으로 기준으로 측정하는 전류와 전압으로 계산된 정상전류는 측정 방향이 반대가 되므로, 정상전압과 위상차는 90도 부근일 것이다. 실제로는 부하단에 부하가 병렬로 존재하므로 부하의 역률에 따라 이 위상차가 90도 근처에서 조금 변동할 것이다.

부하단에 전동기가 있을 경우 선간단락고장이나 지락고장 시 부하단의 전동기가 발전기 역할을 하여 부하단에서 고장점으로 큰 고장전류를 공급는 오류를 방지하려면 기존의 선전류의 크기와 지속시간에 의하여 단말장치가 고장표시 정보를 생성하는 원리에 다음 조건을 추가로 적용해야 한다. 즉 측정하는 전류의 방향이 전원단에서 부하단의 방향일 때, 정상전압의 위상과 정상전류의 위상을 구하여, 정상전압의 위상을 기준으로 정상전류의 위상차가 -90도 부근에 있는 경우에 한하여 고장표시 정보를 생성하도록 개선해야 한다. 이렇게 개선된 방법을 사용하면 고장점 하단에서는 추가된 조건이 만족하지 않기 때문에 더 이상 잘못된 고장표시 정보가 발생하지 않게 될 것이다.

3.3 단말기 측정점에서 전원단과 부하단을 인식하는 방법

이와 같이 개선된 방법을 사용하여 배전계통의 각 단말장치가 고장표시정보를 생성하려면, 배전자동화 시스템의 각 단말장치는 단말장치 설치점에서 측정하는 전류의 방향이 전원단에서 부하단의 방향인지 아니면 그 반대인지를 알아야 한다. 그런데 배전계통은 계통변경에 의한 연계점의 위치 변동으로 단말장치에서 보는 전원단과 부하단이 수시로 변동하기 때문에 단말장치에서 측정하는 전류의 방향을 이용하여 전원단과 부하단의 방향을 항상 알 수 있어야 한다. 그런데 배전계통은 전원단을 시작점으로 하는 방사상의 구조이기 때문에 정상시에는 항상 전원단에서 부하단으로 부하전류가 흐른다.

그러므로 본 논문에서 제안하는 전원단에서 부하단의 방향으로 전류를 측정하는지 아니면 반대방향으로 전류를 측정하는지를 알아내는 방법은 다음과 같다. 만약 정상시에 각 단말장치가 측정하는 정상전압을 기준으로 정상전류의 위상이 1사분면이나 4사분면에 위치하면 전원단에서 부하단의 방향이 측정하는 전류방향과 같다. 그런데 이 위상이 2사분면이나 3사분면에 위치하면 현재 측정하는 전류의 방향과 전원단과 부하단의 방향이 반대라고 할 수 있다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 모의 배전계통에서 지락사고나 선간 단락사고가 일어났을 경우를 가정하여 개선된 고장표시 정보 생성방법이 정확한지를 사례연구의 결과로 보였다.

본 시뮬레이션의 모델계통에서 사용한 선로정수는 0.24+j0.88 [ohm/km]이며, 전원과 부하가 30Km에 위치하고 고장이 중간지점인 15km에서 일어났을 경우에 10km에 위치한 FRTU가 측정하는 전압전류를 고장상단의 전압전류라고 하였다.

먼저 지락고장 시 영상전류 방향을 이용한 개선된 고장표시 정보 생성방법의 타당성을 검토하기 위하여 그림 4와 같은 모의계통의 1선지락 고장시에 고장점 상단과 고장점 하단의 각 단말장치에서 측정하는 영상전압의 크기와 위상, 영상전류의 크기와 위상, 고장상의 전류크기를 부하단의 역률과 고장종류에 따라 살펴보았다. 여기서 부하의 유효전력은 5[MW]이며 역률에 따라 무효전력을 -5[MVAR]에서 5[MVAR]로 변동시켜가며 영상전류가 생길 수 있는 고장에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 본 사례연구는 Matlab power system toolbox를 이용하였으며, 시뮬레이션의 허용

표 1 지락고장 시 영상전압, 영상전류

Table 1 Zero sequence voltage and current in case of line to ground fault

고장종류	부하역률각	고장점 상단						고장점 하단					
		영상전압		영상전류		영상전압 전류 위상차	고장상전류크기	영상전압		영상전류		영상전압 전류 위상차	고장상전류크기
		크기	위상각	크기	위상각			크기	위상각	크기	위상각		
a 상지락	45 도	5081	176	504	-88	96	1687	5421	174.6	69.4	127	-47	0.23
	0 도	5555	174	551	-89	96	1694	6083	172.5	57.9	170	-2.5	0.17
	-45 도	6157	171.2	611	-92	96	1689	6943	169.6	97.8	-149	41	0.27
b 상지락	45 도	5072	56	507	152	95.8	1693	5427	54.7	69.3	7	-48	023
	0 도	5529	54	551.5	150	95.8	1694	6054	52	57.4	50	-2	0.18
	-45 도	6148	51	614	148	95.7	1696	6933	49	92	92	43	0.26
a-b 단락지락	45 도	5088	116	502	-148	96	1694	5428	114	69.2	67.3	-43	0.22
	0 도	5538	114	547	-150	96	1694	6063	112.7	57.5	110	-3	0.17
	-45 도	6162	112	609	-153	96	1695	6947	109.8	97.9	151.5	42	0.25

그림 11 고장점 상단과 하단에서 고장상 전류와 영상전류 크기(x : 시간[sec], y : 전류크기[A])
(a) 고장점 상단 전류, (b) 고장점 하단 전류, (c) 고장점 상단 영상전류, (d) 고장점 하단 영상전류

Fig. 11 Current wave form of the line to ground fault (a) line current at upstream of the fault (b) line current of the downstream of the fault (c) Zero sequence current at upstream of the fault (d) Zero sequence current at downstream of the fault

오차는 1E-5로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 11은 고장점 상단과 고장점 하단에서 고장상의 전류와 영상전류의 크기를 나타내었다. 고장점 상단의 고장상 전류는 크지만 고장점 하단의 고장상 전류는 아주 작다. 그런데 정상시에 영상전류는 부하의 상 불평형에 의해서만 유기되므로 아주 작은 값이다. 그러나 지락고장 발생 시에 고장점 상단에서는 아주 큰 값이 나타나며 고장점 하단에서도 정상 시 보다 매우 큰 값이 나타난다.

이를 검증하기 위하여 본 사례연구는 시뮬레이션 시작 후 0.1초~0.2초 사이에 고장이 발생하도록 시뮬레이션을 하였다 표 1은 시뮬레이션 결과며 c상고장은 a상이나 b 상고장과 마찬가지이므로 표에서는 생략하였다.

고장점 상단에서 영상전압과 영상전류의 위상차는 2사분면의 허축부근에 존재한다. 그러나 부하역률각의 심한 변화에도 불구하고 고장점 하단의 위상차는 1사분면과 4사분면의 실축부근에 존재한다. 따라서 영상전압과 영상전류의 위상차는 고장점 하단과 고장점 상단에서 뚜렷한 차이가 있으므로 이를 영상전류에 의하여 고장표시 정보를 생성할 경우에 용이하게 이용할 수 있다.

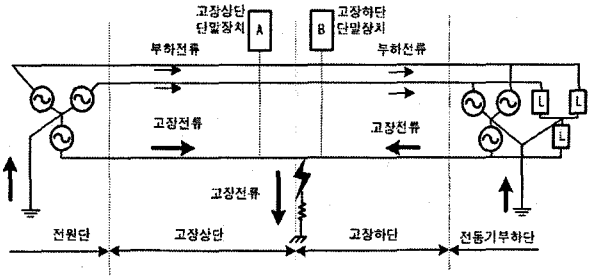


그림 12 전동기 부하가 있을 때 고장모의를 위한 계통도

Fig. 12 Distribution system with large motor load

그림 12는 부하단에 전동기기 있어 사고 시에 발전기 작용을 할 경우의 모의 계통도이다. 사례연구는 부하의 역률을 변동시키면서 부하단에서 고장전류를 공급하는 고장종류에 대하여 고장점 상단과 고장점 하단의 각 단말장치에서 측정하는 정상전압의 크기와 위상, 정상전류의 크기와 위상, 고장상의 전류크기를 살펴보았다.

표 2 전동기 부하가 있을 때 고장 시 정상전압, 정상전류

Table 2 Positive sequence voltage and current when fault with motor load

고장종류	부하역률각	고장점 상단						고장점 하단					
		정상전압		정상전류		정상전압 전류 위상각차	고장상전류크기	정상전압		정상전류		정상전압 전류 위상각차	고장상전류크기
		크기	위상각	크기	위상각			크기	위상각	크기	위상각		
a 상지락	45 도	13490	-2.9	523	-76	-73	1689	13970	-4	335	82	86	843
	0 도	12950	-2.4	574	-78	-76	1688	13160	-3.3	265	82	85	801
	-45 도	12480	-1.9	620	-80	-78	1688	12470	-2.8	204	82	85	764
b 상지락	45 도	13500	-2.9	524	-76	-73	1689	13980	-4	335	82	86	843
	0 도	12950	-2.4	575	-79	-76	1688	13160	-3.3	266	82	85	801
	-45 도	12490	-1.9	621	-80	-78	1688	12480	-2.8	206	82	85	764
a-b 단락지락	45 도	7602	-2.7	1106	-82	-79	1681	8267	-4	588	90	94	844
	0 도	7329	-2.1	1132	-82	-80	1688	7799	-3.3	532	90	93	802
	-45 도	7098	-1.7	1155	-83	-81	1690	7098	-2.8	483	91	94	765
a-b 단락	45 도	10550	-2.8	815	-80	-77	1581	11120	-4	461	87	92	686
	0 도	10130	-2.2	852	-81	-79	1502	10470	-3.3	397	88	91	656
	-45 도	9807	-1.8	890	-82	-80	1499	9949	-2.7	345	88	91	635

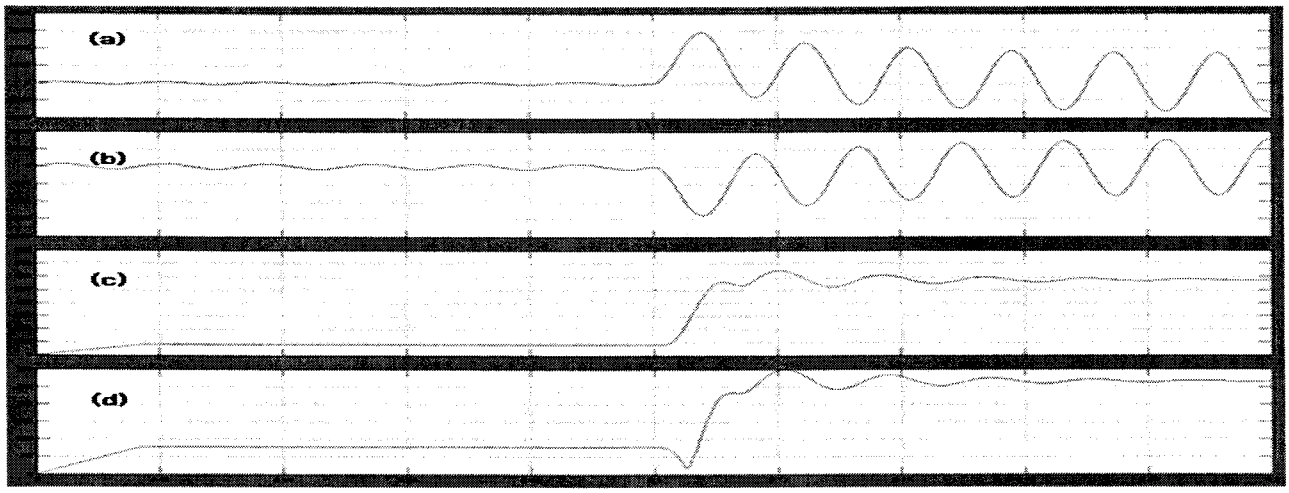


그림 13 전동기 부하의 발전기 작용 시 고장상하단의 고장상 전류 순시값과 정상전류 크기의 실효값
(a) 고장점 상단 고장전류, (b) 고장점 하단 고장전류, (c) 고장점 상단 정상전류, (d) 고장점 하단 정상전류

Fig. 13 Current wave form of the line to ground fault with large motor load (a) line current at upstream of the fault (b) line current of the downstream of the fault (c) Positive sequence current at upstream of the fault (d) Positive sequence current at downstream of the fault

그림 13은 전동기 부하의 발전기 작용시 고장상하단의 고장전류 크기이다. 고장점 상단의 고장상 전류가 크며, 고장점 하단의 고장상 전류도 매우 크다.

표 2는 시뮬레이션 결과이다. 고장점 상단에서 정상전압과 정상전류의 위상차는 4사분면의 허축부근에 존재한다. 그러나 부하역률각의 심한 변화에도 불구하고 고장점 하단의 위상차는 1사분면과 2사분면의 허축부근에 존재한다. 이와 같이 정상전압과 정상전류의 위상차는 고장점 하단과 고장점 상단에서 뚜렷한 차이가 있으므로 이를 상전류에 의하여 고장표시 정보를 생성할 경우에 용이하게 이용할 수 있다.

5. 결 론

배전자동화 시스템의 각 단말장치는 전원을 기준으로 하여 단말장치 설치점 하단에 고장이 있으면 고장표시 정보를 생성하여 배전자동화 시스템 중앙장치로 전송하여, 중앙장치가 이 정보를 가지고 고장구간을 파악하고 복구를 할 수 있도록 한다. 그러나 현재의 배전자동화 시스템 단말장치에서 사용되는 고장표시 정보 생성 알고리즘은 고장 종류나 배전계통 조건에 따라 고장점 하단에서도 잘못된 고장표시 정보를 생성할 수 있다.

본 논문은 현재 배전자동화시스템의 단말장치에서 생성하는 고장표시 정보의 오류를 분석하였으며, 이를 바탕으로 고장전류의 위상을 고장전압의 위상과 비교하는 방법을 사용하여 오류를 방지하는 개선된 고장표시 정보 생성 알고리즘에 관한 것이다. 현재 배전계통에 보급 설치되어 있는 단말장치의 오류를 방지하려면 각 단말장치의 소프트웨어를 본 논문에서 개발한 개선된 알고리즘을 적용한 소프트웨어로 업그레이드 하면 되기 때문에 본 논문에서 제안한 방법은 용이하게 현장 적용이 가능하리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

참 고 문 헌

[1] 임일형, 홍석원, 최면송, 이승재, 하복남, "배전지능화 시스템의 서비스 향상을 위한 P2P 기반의 분산형 통신망 구조", 대한전기학회 논문집, 56권 3호 pp. 443-450, 2007

[2] Kwang-Ho Jung, Myeon-Song Choi, et, al, "A Service Restoration Algorithm for Power Distribution Networks Applying the Multi-Agent System", Vol. 5-2, pp. 125-131, 2005

[3] Yun-Seok Ko, Dae-Seung Hong, et, al, "멀티 에이전트 개념에 기반한 배전계통의 분산 자율적 고장구간 분리 기법", Vol. 55, pp. 227-235, 2006

[4] V, Susheela Devi, D. P. Sen Gupta and G. Anandalingam, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution Systems in Developing Countries", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No.1, pp. 430-438, January 1995.

[5] K. Aoki, H. Kuwabara, T Satoh, and M. Kanezashi, "Outage State Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switching Operation in Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1177-1185, October 1987.

[6] S. J. Lee, K. H. Kim, K. Y. Nam and J. K. Lee, "Service Restoration Expert System Adopting Branch Pattern Based Grouping Strategy in Distribution Systems, pp. 273-278, 1994.

[7] H. Fudo, et al., "An Expert System for Restoration of Distribution Network", 3rd Symposium on Expert System Application to Power Systems, April 1991.

[8] Y. L. Ke, "Distribution feeder reconfiguration for load balancing and service restoration by using G-nets inference mechanism", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, pp. 1426-1433, 2004.

[9] C. M. Huang, "Multi-objective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks", IEEE Trans. on Power System, Vol. 18, No. 2, pp. 867-874, May 2003.

[10] C. S. Chen, C. H. Lin, and H. Y. Tsai, "A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 1073-1080, November 2002.

[11] W. H. Chen, M. S. Tsai, and H. L. Kuo, "Distribution System Restoration Using the Hybrid Fuzzy-Grey Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No.1, pp. 199-255, February 2005.

[12] Popovic, L.M, "A practical method for evaluation of ground fault current distribution on double circuit parallel lines", Vol 15, pp. 108-113, 2000

[13] S. Sobral, V. Costa, M. Campos, and D. Mukhedkar, "Dimensioning of nearby substations interconnected ground system," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 1605-1614, 1988.

저 자 소 개

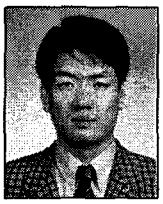
임 일 형 (林 一 亨)

1979년 4월 13일생. 2005년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 031-336-3290

Fax : 031-330-6816

E-mail : sojoo2jan@mju.ac.kr



임 성 일 (林 星 日)

1967년 7월생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년-2001년 한전 전력연구원 연구원. 2004년-2005년 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터 연구 교수. 현재 Iowa State University 방문 연구원.

Tel : 031-330-6815

E-mail : lim7610@mju.ac.kr

최 면 송 (崔 勉 松)

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공박). 1995년 Pensylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-336-3290

E-mail : mschoi@mju.ac.kr

이 승 재 (李 承 宰)

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공박).
1994년 Univ. of Washington 교환 교수.
현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.
Tel : 031-336-6362
E-mail : sjlee@mju.ac.kr

권 성 철 (權 成 鐵)

1972년 9월 24일생. 1996년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1997년 포항공과대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전력공사 전력연구원 배전연구소 선임연구원.
Tel : 042-865-5935
E-mail : sckwon@kepri.re.kr

신 창 훈 (申 昌 勳)

1968년 1월 7일생. 1992년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년~현재 한국전력공사 전력연구원 배전연구소 선임연구원.
Tel : 042-865-5934
E-mail : hoony@kepri.re.kr

하 복 남 (河 福 男)

1958년 1월 10일생. 1994년 충남대 대학원 전기공학과(석사). 2004년 충남대 대학원 전기공학과(공박), 1978년 한국전력공사 입사 이후 대전전력관리처, 광주전력관리처, 전력연구원 근무, 1988년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 배전IT 그룹장.
Tel : 042-865-5930
E-mail : bnha@kepri.re.kr