

한전의 배전자동화 기반 배전선로 고장처리 프로그램 개선 및 적용 효과

(Improvement and Application Effect in Fault Restoration Program based on Distribution Automation System of KEPCO)

박소영* · 신장훈 · 하복남 · 이성우 · 박민호 (한전전력연구원)

So-young Park, Chang-hoon Shin, Bok-Nam Ha, Seong-Woo Lee, Min-Ho Park (KEPRI)

Abstract

This paper presents the improvement and application effect in fault restoration program based on distribution automation system(DAS) of KEPCO. When a fault occurs, fault restoration program can detect fault section based on FI information of DAS, and calculate the best restoration solution by comparing the load capacity of outage area and the spare load capacity of connected distribution lines, and propose switch operating procedure for fault section isolation and outage restoration. Fault restoration program was applied to real field and it was verified that this program is applicable to diverse field cases. By using this fault restoration program to the field, human error can be reduced and fault procedure can be more reliable, accurate, and fast.

1. 서론

고품질 고신뢰도의 전력공급에 대한 현대사회의 요구가 증가함에 따라 고장으로 인한 전력공급의 중단은 고객에게 큰 불편을 줄뿐만 아니라 사회적으로도 큰 손실을 초래할 수 있다.[1] 이에 따라 전력회사는 선로 순시점검 및 관리로 설비 노후로 인한 사고를 예방하기 위해 노력하고 있지만 주변 환경에 노출되어 있는 배전선로의 특성상 사고 발생은 피할 수 없는 문제이므로 사고 발생시 신속하고 믿을 수 있는 고장검출 및 복구가 매우 중요하다.

한전에서는 배전자동화시스템(DAS : Distribution Automation System)을 자체개발하여 현재 전 배전 사업소에서 설치 및 운영함으로써 원거리에 산재되어 있는 배전 설비를 원격에서 감시하고 제어하는 것이 가능해졌고, 이는 보다 신속한 고장처리를 가능하게 하였다.[2] 고장발생 즉시 현장 단말장치(FRTU : Feeder Remote Terminal Unit)에서 큰 고장전류를 감지하여 고장정보(FI : Fault Indicator)를 발생시키고, 운영자는 중앙제어장치에서 고장정보를 확인하여 고장구간을 즉시 판단할 수 있다. 또한 고장처리 과정 중에 필요한 개폐기 조작절차인 고장구간 분리 및 건전구간 복구와 원상복구를 DAS가 도입되기 전에는 직접 보수원을 현장에 파견하여 수행했던 반면, DAS가 도입된 후 운영자가 직접 원격에서 개폐기 제어를 수행할 수 있게

됨으로써 고장처리 시간과 인력을 크게 단축시켰다.

하지만 배전계통이 점차 복잡해짐에 따라 고장 발생시 정전부하를 복구할 적절한 연계선로를 탐색하고 복구절차를 계산하는 것은 매우 복잡한 문제가 되었다.[3] 과거에는 운영자의 경험과 직관에 의존하여서도 판단이 가능했던 반면, 연계선로와 개폐기 수가 과거에 비해 크게 증가하여 고려해야 할 조건이 많아진 현재 상황에서는 운영자의 판단에 의존함으로써 휴먼에러가 발생할 가능성이 많아지고 최적의 고장복구 해로 처리하지 못함으로써 고장파급을 초래할 수도 있다. 이에 따라 고장 발생시 고장을 검출하고 부하용통을 계산하여 조작절차를 제공할 수 있는 고장처리 프로그램에 대한 필요성이 요구되었고, 이에 따라 한전에서는 DAS 기반의 자동고장처리 프로그램을 개발하였다. 이 외 DAS의 기본적인 원격감시제어 기능 외에 상시개방점 최적화, 과부하 해소, 기술계산, 계통오류검출 등의 응용된 기능 또한 개발하여 복잡한 계통 분석 및 운영시 정확성과 편리함을 제공하였다.[4]

본 논문에서는 고장처리 프로그램을 실제계에 적용 가능하도록 보완 개발하였고, 현장적용시험을 통해 신뢰도를 향상시키고 적정성 및 안정성을 검증하였다. 고장처리 프로그램의 사용으로 컴퓨터에 의한 부하용통 계산을 통해 최적의 고장처리 방안을 수립할 수 있고, 따라서 휴먼에러로 인한 계통 오조작 및 고장파급을 방지할 수 있다.

2. 고장처리 알고리즘

고장처리 프로그램은 복구방안 후보탐색 단계와 복구방안 후보평가 단계를 거쳐 최적의 복구 해를 도출한다. 하나의 고장을 복구할 수 있는 복구방안은 여러 가지일 수 있으므로 가능한 모든 복구방안 후보를 탐색하고 이들을 평가하여 그 중 최적의 복구방안을 도출하고 운전원에게 제시한다.

2.1. 복구방안 후보 탐색 단계

복구방안 후보 탐색 단계에서는 6가지 기본 복구방안을 적용하여 선로의 허용전류 용량과 전압강하 제약조건을 만족하는 복구방안 후보를 탐색한다. 배전계통은 비상시 정전없이 전력을 공급하기 위해 연계와 분할 형태로 구성되고, 한국의 경우 현재 6분할 3연계를 기준으로 배전계통이 구성되어 있다. 따라서 최대 3개의 연계선로를 이용하는 전제 하에 정전구역에 인접한 연계선로와 건전부하절체를 포함하여 6가지 기본 복구방안을 구축하였고, 표 1에 각 복구방안별 특징을 설명하였다.

2.2. 복구방안 후보 평가 단계

복구방안 후보 평가 단계에서는 탐색한 복구방안 후보들 중 최적의 해를 도출하기 위해 스위칭 조작회수, 부하균등화, 건전부하절체를 독립적으로 평가하여 가중치 합계를 통해 종합적으로 평가한다. 스위칭 조작회수가 작고 부하를 균등하게 배분하고 건전부하절체를 사용하지 않거나 최소화하는 복구방안 후보가 높은 점수로 평가된다.

한전 배전선로는 평상시 용량은 10MW, 비상시 용량은 14MW, 3연계를 기준으로 운영되고 있으므로 고장발생시 선로 전체가 정전되어 모두 절체해야 하는 상황에서도 최대 3개 연계선로를 이용하거나 추가적으로 건전부하절체를 수행하여 복구할 수 있다. 기준상 배전선로 평상시 용량이 10MW이지만 실제 한전 사업소에서는 대체로 충분한 여유를 확보하고 배전선로를 운영하기 때문에 선로 전체를 절체해야 하는 고장시에도 하나의 연계선로를 이용한 복구방안으로 대부분 복구가 가능하다.

3. 고장처리 프로그램

배전선로에 고장발생시 DAS 기반의 고장처리 프로그램의 진행절차는 FI정보를 이용한 고장인지 및 고장구간 검출, 부하용량 계산을 통한 최적 복

구방안 도출, 고장구간 분리 및 건전구간 부하절체를 위한 개폐기 조작절차 제시, 보수원 현장 출동 및 고장수리 후 원상복구를 위한 개폐기 조작절차 제시 순서로 진행된다. 이는 운전원이 실제로 현장에서 고장처리하는 절차와 동일하다. 단, 고장구간 검출 및 최적 복구해 도출, 개폐기 조작절차 제시 시 프로그램이 DAS 데이터베이스에 저장된 내용을 기반으로 부하용량을 계산하고 제시하므로 운전원의 판단에 의존했던 과거의 고장처리 과정에 비해 훨씬 정확하고 신속하다.

표 1. 기본 복구 알고리즘
Table 1. Basic Restoration Algorithm

복구방안	기본사항	특징
고장선로상의 루프에 의한 복구방안 (SELF)	○고장선로 내부 루프상의 상시개방 스위치를 투입하여 고장 복구	○다른 선로에 영향을 미치지 않으므로 가장 좋은 복구해
하나의 연계선로를 이용한 복구방안 (SGR)	○정전구간 전체를 공급 여유용량이 충분한 하나의 연계선로로 절체하는 복구방안	○스위칭 수 : 1번 ○가장 많이 사용되는 복구방안
두 개의 연계선로를 이용한 복구방안 (DGR)	○정전구간을 둘로 나누어 두 개의 연계선로로 절체하는 복구방안	○스위칭 수 : 3번 ○부하분할 개폐기는 두 상시연계점의 직선 경로 상에 위치하고 연계선로간의 부하균등화를 기준으로 선택
세 개의 연계선로를 이용한 복구방안 (TGR)	○정전구간을 셋으로 나누어 세 개의 연계선로로 절체하는 복구방안	○스위칭 수 : 5번 ○두 개의 부하분할 개폐기는 정전부하를 가장 균등하게 셋으로 나누는 위치로 선정
하나의 연계선로와 건전부하절체를 이용한 복구방안 (SGRLT)	○정전구간 전체를 레벨 1 연계선로로 절체하고, 레벨2 연계선로의 건전부하절체를 통해 레벨1 연계선로의 과부하를 해소하는 복구방안	○스위칭 수 : 3번 ○건전부하절체 : 1회 ○부하분할 개폐기는 레벨1 연계선로에 발생한 과부하량보다 크면서 가장 가까운 개폐기 선택
두 개의 연계선로와 건전부하절체를 이용한 복구방안 (DGRLT)	○정전구간을 둘로 나누어 레벨1 연계선로에 절체하고, 레벨2 연계선로로의 건전부하절체를 통해 레벨1 연계선로의 과부하를 해소하는 복구방안	○스위칭 수 : 5번 ○건전부하절체 : 1회 ○레벨1 연계선로로 가능한 많은 부하절체

※ 레벨1 연계선로 : 고장선로와 직접 연계된 연계선로
레벨2 연계선로 : 레벨1 연계선로의 연계선로

3.1. 고장구간 변경 및 확정

DAS에서는 고장이 발생하면 정상전류보다 큰 고장전류를 감지하여 FRTU에서 FI를 발생하고 이를 중앙제어장치로 전송하며, 중앙제어장치에서는 발생한 FI 정보를 수집하여 고장구간을 검출한다. 고장전류는 선로의 전원측에서 고장점으로 흐르기 때문에 FI는 고장구간의 전원측 개폐기에서

만 발생하고 부하측 개폐기에는 발생하지 않는다. 따라서 FI가 발생한 자동화개폐기 중 가장 부하측 개폐기의 바로 부하측이 고장구간이고 프로그램에서는 이를 판단하여 고장구간을 검출한다.

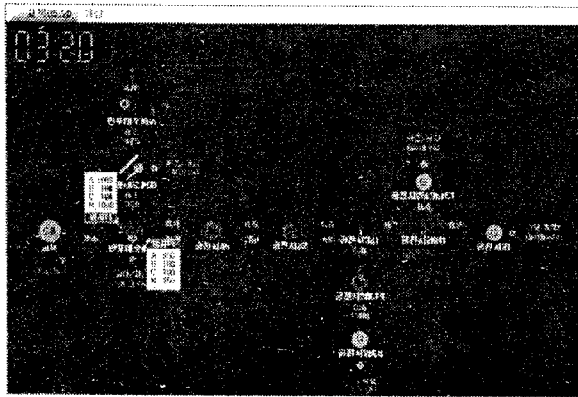


그림 1. 고장발생에 따른 FI발생
Fig. 1. FI occurrence when a fault occurs

프로그램은 FI 정보를 기반으로 고장구간을 판단하기 때문에 올바른 FI 정보를 검출해야 올바른 고장구간을 검출할 수 있다. 만약 현장기에서 잘못된 FI를 발생시키거나 통신문제로 FI가 제대로 전송되지 않는 등의 문제로 FI 정보가 정확하지 않다면 프로그램에서는 올바른 고장구간을 검출할 수 없다. 이러한 경우에 대비해 프로그램이 검출한 고장구간은 운전원의 승인을 받도록 하고 운전원이 판단하였을 때 잘못된 고장구간을 검출하였다면 고장구간을 변경할 수 있다.

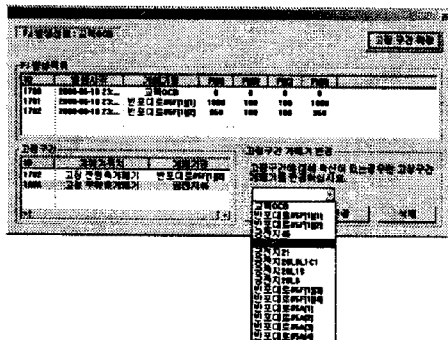


그림 2. 고장구간 확정 및 변경 화면
Fig. 2. Screen print for fault section decision and change

고장 전원측 또는 부하측 개폐기를 변경하여 고장구간을 변경할 수 있는데, 이 때 변경 가능한 개폐기는 고장선로 내 모든 자동화개폐기가 될 수 있다. 하지만 수동제어 또는 제어금지로 설정되거나 통신 불량으로 제어가 불가능한 자동화개폐기는 수동개폐기와 동일하게 간주하여 변경 가능한 개폐기 대상에서 제외하여 현장의 다양한 상황에 적용 가능하도록 하였다.

3.2. 복구방안 계산 및 조작절차 제시

3.2.1. 고장정보 및 정전구역 정보 제공

고장구간이 확정되면 고장처리 화면을 출력하고 고장정보와 정전구역 정보를 제공한다. 고장정보에는 고장선로, 동작보호기기, 전체정전부하량, 전원측 정전부하량, 고장구간 부하량 등의 고장선로 정보를 제공한다. 정전구역 정보에는 고장으로 인해 보호기기가 동작하여 고장구간이 아님에도 불필요한 정전을 경험하게 되는 고장구간의 부하측 영역에 대한 정보를 제공한다. 고장처리시 정전구역은 연계선로로 절체하여 복구해야 하기 때문에 정전구역의 부하량을 제공함으로써 부하음통 계산시 연계선로와 정전구역의 부하량 비교가 용이하도록 하였다.

3.2.2. 복구방안 계산 및 제시

고장정보 및 정전구역 정보를 확인한 후 “복구방안 탐색”을 실행하면 복구방안 후보 탐색 및 평가 단계를 수행하여 최적의 복구방안을 도출하고 이에 대한 복구방안 연계선로 정보와 복구조작절차를 제공한다. 복구방안 연계선로 정보에는 연계선로명, 복구전·후 부하량, 정전구역을 복구하였을 때 최대전압강하점과 강하율, 복구를 위한 조작회수를 제공한다.

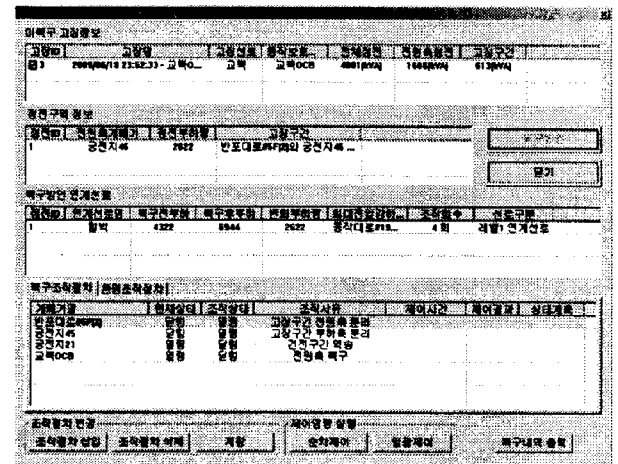


그림 3. 고장처리 - 고장관련 정보, 복구 및 환원조작절차 제시
Fig. 3. Screen print for fault restoration - presents fault-related information and switch operation procedure

3.2.3. 복구 및 환원 조작절차 제시

복구조작절차는 고장구간 전원측 분리, 고장구간 부하측 분리, 상시개방점을 투입한 건전구간 역송, 동작 보호기기 투입으로 전원측 복구 순으로 제공한다. 복구조작 후 현장에 보수원이 출동하여 고장을 수리한 후에는 원래 계통상태로 원상복귀하는 환원조작절차를 제공한다.

조작절차는 개폐기명, 현재상태와 조작상태, 조작사유를 제공하고 이를 순차제어 또는 일괄제어

할 수 있다. 순차제어를 이용하면 운전원이 조작절차를 하나씩 순차적으로 수행할 수 있고, 일괄제어를 이용하면 하나의 조작절차가 성공하면 자동으로 다음 조작절차를 수행한다.

3.2.4. SCADA 연계 여부에 따른 CB제어

한전에서 변전자동화시스템(SCADA)과 DAS는 과거에 분리되어 있었으나 최근 연계에 대한 필요성이 부각되어 일부 사업소를 대상으로 한 시범사업을 시작으로 점차 SCADA-DAS 연계를 확대하는 추세이다. 연계 사업소에서는 CB 상태정보 감시가 가능하나 미연계 사업소에서는 CB 상태정보를 여전히 실시간 감시하지 못하고 유선으로 통보받는 형태를 유지하고 있다. 연계 사업소에서도 CB의 상태정보 감시만 가능하고 CB 제어는 불가능하다. 따라서 조작절차에 CB 제어가 있는 경우 이를 수동제어로 명시하고 아래의 그림 4와 같은 메시지를 출력한다. “수동으로 제어성공을 표시하겠습니까?” 라는 질문에 SCADA 연계 사업소의 경우에는 “아니오”를 선택하고 변전소로부터 CB 제어결과를 기다린다. 변전소에서 CB가 제어되면 SCADA 연계를 통해 CB 제어결과를 전송받고 이를 자동으로 인지하여 제어결과를 “성공”으로 표시하고 조작절차를 완료한다. SCADA 미연계 사업소의 경우에는 변전소로부터 CB 제어결과를 통보받을 때까지 대기한 후 통보시 “예”를 선택하여 수동으로 제어성공을 표시하고 조작절차를 완료한다.

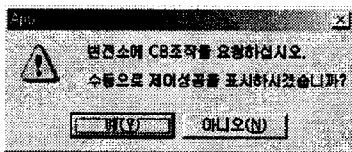


그림 4. 고장구간 변경 및 확정 화면
Fig. 4. Screen print for fault section change and decision

3.2.5. 조작절차 변경 및 복구내역 출력

프로그램이 제공한 조작절차를 삽입하거나 삭제하여 변경할 수 있고, 이를 저장하여 변경된 조작절차를 고장처리 이력으로 저장할 수 있다. 또한 고장처리 화면의 모든 정보를 엑셀 파일로 출력하여 저장할 수 있다.

3.3. 고장모의 기능

실제로 고장이 발생하지 않은 상황에서 프로그램 상에서 고장을 모의하여 고장복구 방안을 미리 검토할 수 있고 비상시 상황에 대한 대처방법을 미리 훈련할 수 있다. DAS에서는 기본적으로 실제 운전시 사용하는 온라인 모드와 검토 및 연습

용으로 사용하는 시뮬레이션 모드를 구분하여 제공한다. 시뮬레이션 모드에서는 현장 상황과 상관없이 고장 발생 상황을 시뮬레이션할 수 있기 때문에 원하는 위치를 고장구간으로 가정하고 FI정보와 고장전류 값을 입력하여 고장을 발생하고 고장처리 프로그램을 검토할 수 있다. 시뮬레이션 모드에서는 조작절차를 수행하여도 현장에는 적용되지 않기 때문에 조작절차를 순차제어 또는 일괄제어로 수행하여 직접 계통을 바꾸어가며 검토할 수 있는 장점이 있다.

고장 모의 기능은 온라인 모드에서도 제공된다. 고장이 발생하지 않은 상황에서 고장처리 프로그램을 실행하면 그림 5와 같은 고장모의 화면이 출력된다. “모의 실험을 하시겠습니까?” 라는 질문에 “예”를 선택하면 고장구간 확정 창이 출력된다. 여기에서 고장구간을 모의하고자 하는 위치로 변경한 후 확정하면 고장처리 화면이 출력되면서 고장복구 방안을 검토할 수 있다.

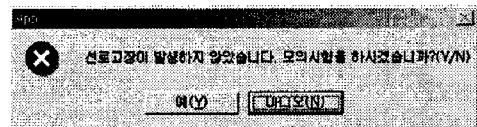


그림 5. 고장모의 화면
Fig. 5. Screen print for fault simulation

고장 모의시 RC 부하측을 고장구간으로 모의한 경우에는 RC가 실제로 open 되지 않았지만 open 된 것으로 간주하고 고장복구 방안을 계산함으로써 실제 고장상황과 동일하게 처리한다.

3.4. 고장복귀

원상복귀를 위한 환원 조작절차를 확인하기 위해서는 현장 보수 중 고장처리 화면을 닫지 않고 대기하여야 한다. 만약 고장처리 화면을 닫았다면 “고장복귀” 메뉴에서 미완료된 복귀대상을 확인할 수 있고 이에 대한 환원 조작절차를 제공하고 제어 또한 가능하다.

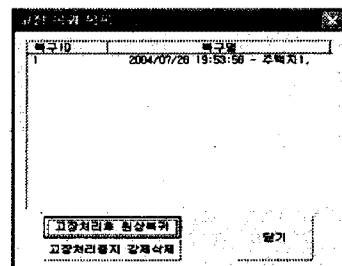


그림 6. 고장 복귀 화면
Fig. 6. Screen print for fault return

3.5. 고장정보관리

고장발생 및 고장처리 이력은 DAS의 데이터베이스

이스에 저장되고 이를 고장정보관리 메뉴에서 확인할 수 있고 보고서로 출력이 가능하다. 기본정보에서는 고장시간 및 선로, 고장전류, 개폐기 조작이력을 확인할 수 있고, 세부정보에서는 고장개요 및 특이사항 등을 작성하여 이력으로 저장한 후 보고서 형태로 출력할 수 있다.

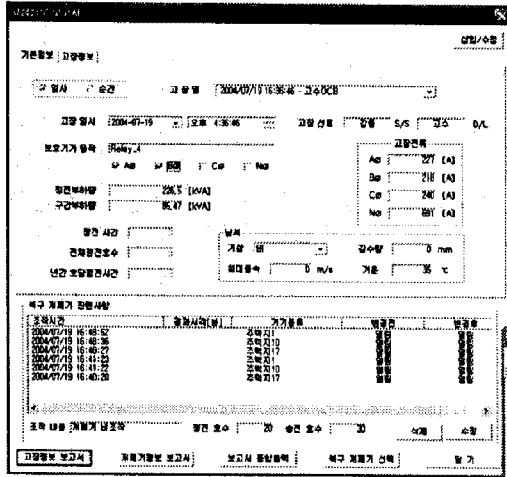


그림 7. 고장정보관리 화면
Fig. 7. Screen print for fault history management

4. 고장처리 프로그램 적용 효과

배전선로의 고장은 정전과도 직결되는 민감한 사항이고 배전선로의 운영기준은 있으나 실제로는 사업소별로 매우 다양하게 운영되고 있기 때문에 고장처리 프로그램을 현장에 적용하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서 현장 시범적용을 통해 현장에서 발생할 수 있는 다양한 예외상황에 대처할 수 있도록 프로그램을 개선하고 시스템을 보완함과 동시에 신뢰도를 검증하였다.

현재는 복구방안 절차의 적정성을 검증하고 있는 단계이고, 향후 순차제어 및 일괄제어까지 검증하여 자동 고장처리를 검증한 후 전국 사업소에 본격 적용할 계획이다.

4.1. 현장적용 시험

배전자동화 시스템이 광역화 되어 주요 센터 사업소에서는 로컬 사업소 뿐만 아니라 예하 사업소의 계통까지 감시해야 한다. 이를 반영하여 로컬 사업소에서만 실행 가능하였던 고장처리 프로그램을 광역화 사업소에도 적용 가능하도록 보완 개발하였고 현장적용 시험 결과 성능을 검증하였다.

또한 지중 다회로개폐기의 내부고장 처리, 다회로차단기 부하측 고장발생시 등 실제 현장에서 발생할 수 있는 다양한 경우에 대하여 적용 가능하도록 보완 개발하였고 성능을 검증하였다.

4.2. 적용효과

간단한 배전선로에 고장이 발생한 경우에는 운전원의 경험과 직관에 의해 복구방안을 쉽게 도출할 수 있지만 복잡한 선로의 경우에는 최적의 복구방안을 도출하는 데 어려움이 매우 많다. 이러한 경우 고장발생시 고장처리 프로그램을 실행하여 프로그램에서 제공하는, 믿을 수 있는 복구방안을 참고하여 고장처리를 수행할 수 있다. 이에 따라 휴먼에러로 인한 사고 파급 및 오조작을 방지할 수 있고 운전원의 업무에 대한 부담과 인력소모를 줄일 수 있다. 사람에게만 의존해 오던 과거의 고장처리에 비해 정확성과 신속성이 훨씬 향상될 수 있다.

또한 고장정보 관리와 보고서 작성을 편리하게 수행할 수 있다는 점에서 업무효율 향상에 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 한전의 DAS 기반 고장처리 프로그램의 알고리즘 및 프로그램 개선 내용과 현장적용 시험 결과 고장처리 프로그램의 적용 효과를 입증하였다. 고장처리 프로그램이 DAS 기반의 FI 정보를 이용하여 고장을 인지하고, 고장구간 확정 후 6가지 기본 복구방안 중 최적의 복구방안을 도출하여 복구 및 환원 조작절차를 제시함을 보였다. 현장적용 시험 결과 프로그램의 안정성과 신뢰성을 검증하였고, 고장발생시 고장처리 프로그램이 최적의 복구방안을 정확하고 신속하게 계산하여 제시함으로써 운전원의 실수로 인한 고장파급 또는 계통 오조작을 방지할 수 있다는 점에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] So-Young Park, Chang-Hoon Shin, Seong-Chul Kwon, Bok-Nam Ha, Myeon-Song Choi, "A Fault Detection and Service Restoration Method by Shifting the Feeder Tie Switch for Ungrounded Distribution System", CMD 2008, International Conference, pp. 352-356, Apr., 2008
- [2] 하복남, 한용희, 이중호, 조남훈, 임성일, "신 배전자동화 시스템의 배전선로 고장인지 및 분석방법", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 1999
- [3] Seong-II Lim, Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi, Dong-Jin Lim, Bok-Nam Ha, "Service Restoration Methodology for Multiple Fault Case in Distribution Systems", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 21, No.4, pp.1638~1644, 2006
- [4] Jeel-Ho Seol, Bok-Nam Ha, Mi-Ae Jeong, "The Upgraded Application Program for Distribution Automation System", APAP 2004, International Conference, Oct., 2004