

UPFC를 포함한 송전선에서의 전류차동 보호 방식의 개선

(Improvement of the Differential Current Relaying Method for Protecting the Transmission Line Equipped with UPFC)

임정욱* · 권영진 · Thordur Runolfsson

(Jung-Uk Lim · Young-Jin Kwon · Thordur Runolfsson)

요 약

본 논문에서는 대표적인 유연송전기기인 UPFC(Unified Power Flow Controller)를 대상으로 UPFC 운전이 송전 계통에 미치는 영향을 분석하여 송전선 보호를 위한 전류차동방식을 개선하였다. UPFC가 포함된 송전계통을 대상으로 UPFC의 여러 운전 모드에 대한 동적 해석을 통하여 UPFC 동적 특성이 송전선 보호를 위한 전류차동 계전방식에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 바탕으로 UPFC가 운전하고 있을 때의 고장을 효과적으로 판단할 수 있도록 개선된 전류차동 보호방법을 제안하였고, 제안된 방법의 타당성을 시뮬레이션으로 입증하였다.

Abstract

The objective of this paper is to analyze power system dynamics influenced by UPFC(Unified Power Flow Controller) operation and to develop a refined DCRM(Differential Current Relaying Method) to protect the transmission line with UPFC effectively. The implementation of control strategies for UPFC introduces new power system dynamic problems that must be considered while applying the conventional DCRM. In this paper, impact of UPFC operation on the DCRM has been reviewed and a refined DCRM has been proposed to detect faults properly in spite of UPFC operation. The proposed method is verified by simulation on the line-faulted system with UPFC.

Key Words : Unified Power Flow Controller(UPFC), Transmission Line Protection, Differential Current Relaying Method(DCRM)

1. Introduction

최근 전력사용량의 증가 및 전력설비의 디지털화

경향에 따라 전력공급에 있어서 SQRA라고 불리는 안전성(Security), 품질(Quality), 신뢰성(Reliability), 이용가능성(Availability)을 확보하기 위하여 새로운 형태의 전력전송기술이 개발되고 있다[1]. 이런 맥락에서 전력전송의 유연성(Flexibility) 및 신뢰성을 확보할 수 있는 기술인 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System)의 도입은 필수적이라 하겠다. 여러 유연송전기기 중에서 UPFC (Unified Power

* 주저자 : 명지대학교 전기공학과 연구교수
Tel : 031-330-6361, Fax : 031-330-6816
E-mail : julim@mju.ac.kr
접수일자 : 2005년 6월 29일
1차심사 : 2005년 7월 1일, 2차심사 : 2005년 8월 22일
심사완료 : 2005년 8월 29일

Flow Controller)는 송전선로에 직렬 및 병렬로 연계되어 송전선로의 조류제어와 모선의 전압제어를 동시에 수행할 수 있으며, 전압, 전류, 임피던스, 역률 등의 모든 종류의 계통 파라미터를 변화시킬 수 있다. 따라서 UPFC의 설치위치, 운전모드, 투입용량 등에 따라 계통 파라미터가 변하기 때문에, 송전계통에 설치된 계전기가 이에 영향을 받아 송전선 고장에 대하여 오·부동작을 일으킬 소지가 있다.

UPFC의 운전으로 파라미터의 변화와 더불어 계통의 동적 특성도 변한다. 이러한 변화에도 보호계전기는 고장을 신속하게 판별하고 고장구간을 계통으로부터 신속히 분리시켜야 하는 목적을 달성할 수 있도록 신속한 계통 변화에 적응해야 한다. 이를 위해서는 UPFC의 동적 특성을 반영하여 기존의 보호계전방법을 개선해야 한다.

현재 송전선 보호를 위하여 전류차동방식과 거리계전방식이 널리 적용되고 있다. 거리계전기의 경우, 많은 문헌에서 UPFC의 내부 변수를 포함한 임피던스 식이 제시되었다[2]. 그러나 전류차동방식의 경우에는 UPFC 운전으로 인한 오동작 방지를 위하여 계전방식 자체를 개선해야 한다.

본 논문에서는 UPFC 운전이 기존의 전류차동 계전방식에 미치는 영향을 분석하고, 이를 토대로 UPFC 운전의 영향에도 고장을 효과적으로 판단할 수 있도록 이를 개선하였다.

2. 본 론

2.1 UPFC의 3상 수리 모델

UPFC는 선로 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 신속히 제어하여 선로로 전송되는 유효·무효전력을 보상할 수 있는 직병렬보상기기이다. UPFC가 포함된 송전계통의 고장 해석을 위하여 그림 1에 3상 등가 회로가 제시되었다. 이 등가회로는 Nabavi-Niaki와 Iravani에 의해 제안된 UPFC 등가회로에 대하여 UPFC 상태 변수의 초기 값 계산을 위하여 물리적인 의미에 기반을 두고 변형하였다[3].

시뮬레이션을 위한 대상 계통의 기준 전압은 154[kV]이고, 송전단과 수전단의 위상차는 15도이

며, 선로의 총 길이는 200[km]이다. UPFC는 효율적인 송전용량 증대를 위하여 양단 전원을 연결하는 선로의 중간인 100[km] 지점에 설치되었다[4]. 선로의 정상분 임피던스는 $0.017816+j0.31388[\Omega]/[km]$ 이고, 영상분 임피던스는 $0.29522+j1.0399[\Omega]/[km]$ 이다. UPFC 직렬전압원의 크기는 계통 전압의 0.3[p.u.]인 46.2[kV]이고 UPFC의 특성에 따라 직렬전압원의 위상은 0도에서 360도까지 가변할 수 있다.

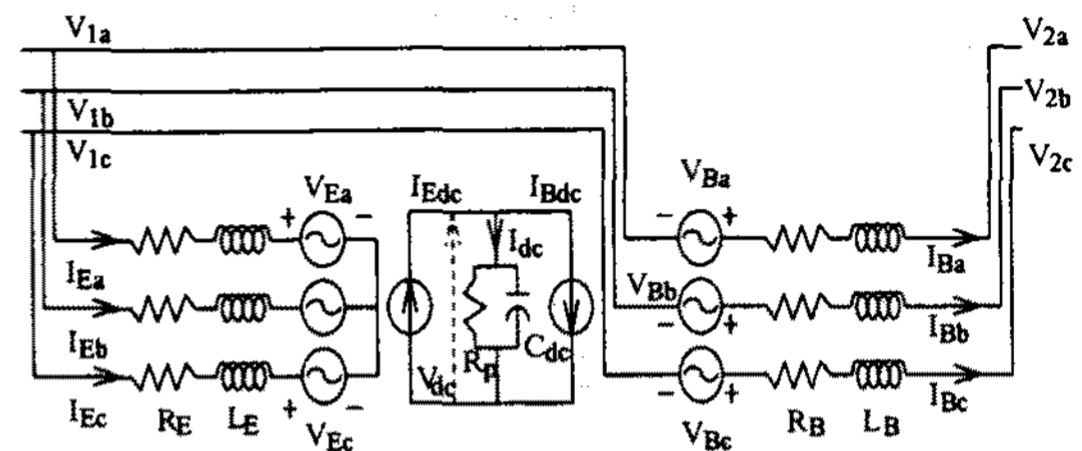


그림 1. UPFC 3상 등가회로
Fig. 1. Three-phase equivalent circuit of UPFC

2.2 UPFC의 운전 모드별 동적 해석

UPFC는 STATCOM모드, SSSC모드, UPFC모드의 세 가지 운전모드로 동작이 가능하다. 표 1에서 각 모드별 관련 인버터 및 제어 대상을 나타내었다.

표 1. UPFC 운전모드
Table 1. UPFC operating modes

운전모드	인버터	제어 대상
STATCOM	병렬인버터	전압 및 무효전력 제어
SSSC	직렬인버터	주입전압제어
UPFC	병렬인버터	전압 및 무효전력 제어
	직렬인버터	조류 및 주입전압 제어

STATCOM 모드에서는 모선전압에 동기된 병렬전압원이 계통과 무효전력을 주고받음으로써 전압을 제어하거나 장거리 선로 중간지점에 설치되어 무효전력 제어로 조류를 원활하게 흐르게 할 수 있다. 그림 2에서는 STATCOM 모드로 운전한 결과를 나타내었는데, 총 1초간 모의하였고, 모의시작후 0.5초에 UPFC가 운전을 시작하여 모선 전압을 각각 0.99[p.u.]에서 1.0[p.u.]로 증가 또는 감소시켰다.

SSSC 모드에서는 송전선로 전류를 기준으로 ± 90

UPFC를 포함한 송전선에서의 전류차동 보호 방식의 개선

도 위상의 전압원을 계통에 직렬로 주입한다. SSSC 모드에서는 계통의 유·무효전력을 페루프로 제어하지 않고, 단지 주입전압의 크기만을 제어하므로 유·무효전력이 상호 간섭되며 변화될 뿐이다. 그림 3에서는 SSSC 모드로 동작한 결과를 나타내었는데, 각각 직렬 커패시터와 직렬 리액터처럼 동작하였다.

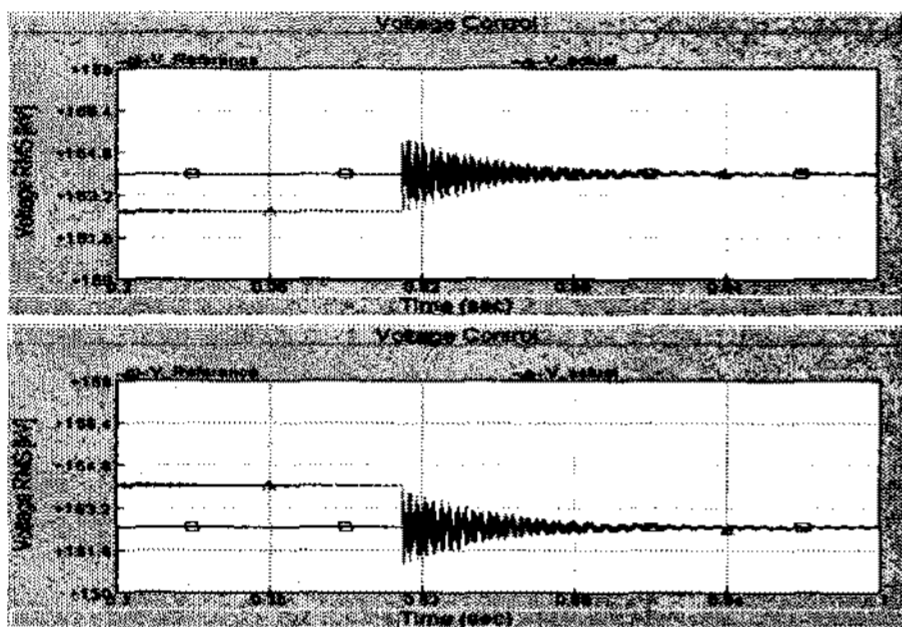


그림 2. UPFC가 STATCOM 모드로 운전한 결과
Fig. 2. STATCOM mode operation

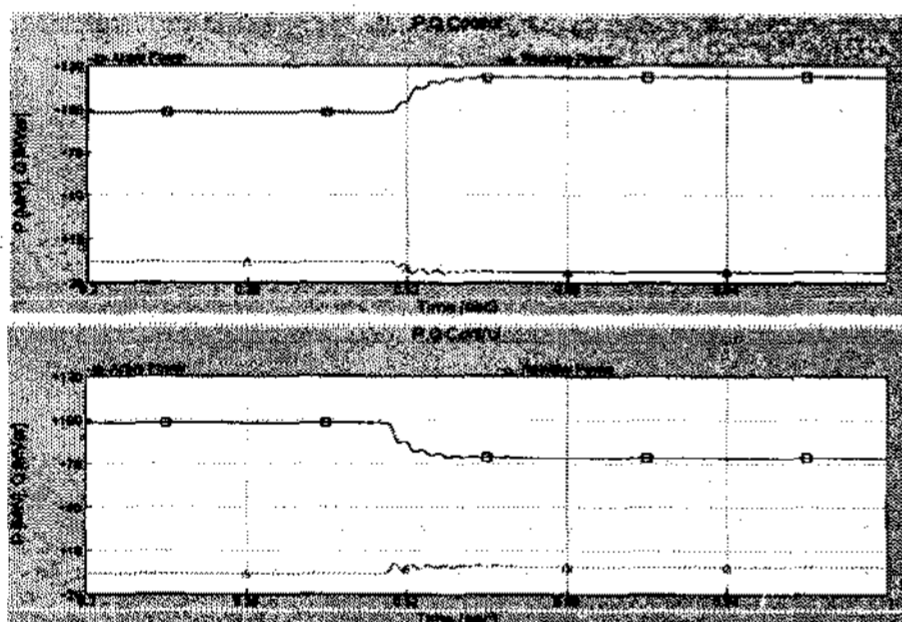


그림 3. UPFC가 SSSC 모드로 운전한 결과
Fig. 3. SSSC mode operation

UPFC모드에서 직렬전압원은 두 모선간의 전압 위상각과 크기를 모두 변화시켜 선로조류를 변화시키며, 병렬전압원은 해당 모선의 전압을 제어하고 직렬전압원에 의해 소요되는 유효전력을 공급한다. UPFC의 병렬전압원은 설치 모선의 전압을 1.0[p.u.]로 유지시키도록 하고 직렬전압원의 크기와 위상을 변화시켜 보았다. 그림 4에서 직렬전압원의 크기는 0.3[p.u.]로, 위상은 120도로 설정하고 동작시킨 결과를 나타내었다. 동작 결과에서 알 수 있듯이 UPFC에서 직렬전압원의 크기와 위상은 UPFC가 제어할 유효전력과 무효전력의 양을 결정한다. 참고로 UPFC

운전 지시는 UPFC를 통해 흐르는 유효전력과 무효전력 값으로 주어진다.

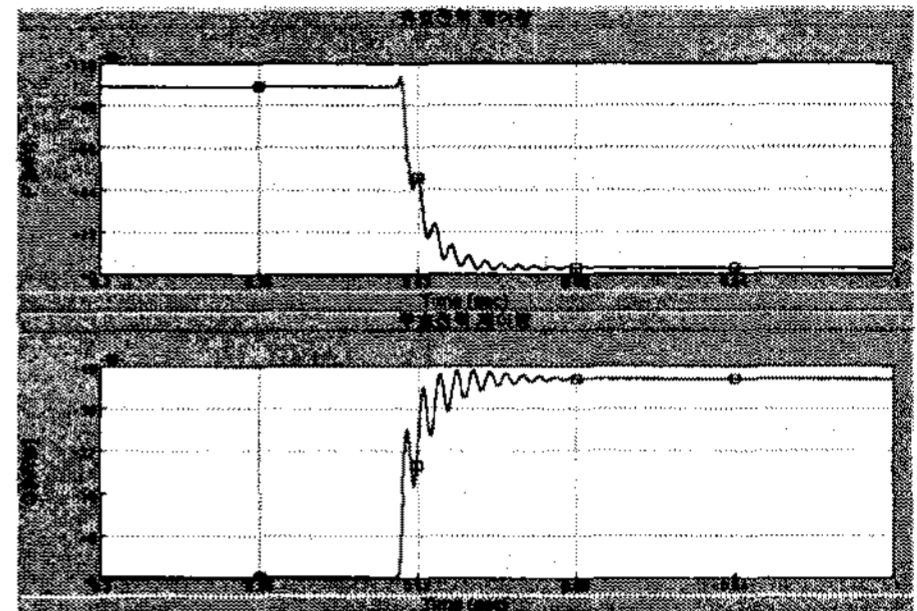


그림 4. UPFC가 UPFC 모드로 운전한 결과
Fig. 4. UPFC mode operation

2.3 전류차동방식

송전선로는 장거리에 걸쳐 설치되어 사고 위험에 많이 노출되기 때문에 계통 고장 발생요인 중 대다수를 차지하고 있다. 송전선 보호방식으로는 전류차동 방식과 거리계전 방식이 널리 적용되고 있는데, 그 중에서 전류차동방식에 대한 내용은 다음과 같다.

전류차동방식은 선로 양단의 전류 값을 비교하여 내부고장과 외부고장을 판단하는 방식으로 자기구간의 고장에 대해서는 거의 완벽한 보호가 가능하다. 그림 5에서 알 수 있듯이 A단에서는 자기 단의 전류와 상대단에서 전송된 전류의 합이 일정한 정정치를 벗어나면 내부고장으로 판단하여 차단기를 트립시키며 B단에서도 자기단의 전류와 상대단의 전류의 합이 일정한 정정치 이상이면 차단기를 트립시켜 고장구간을 계통으로부터 분리한다[5].

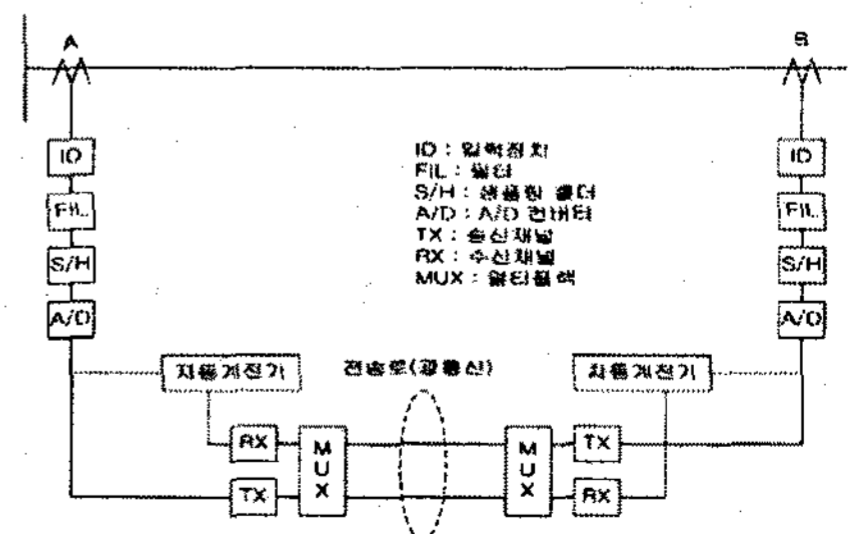


그림 5. 전류차동방식
Fig. 5. The differential current relaying method

그림 6에서는 특정 계전기의 전류차동요소 비율 특성을 나타내었는데, 양단 전류의 Scalar 합인 억제 전류(Constraint Current)와 양단 전류의 Vector 합인 동작전류(Operating Current)의 비율에 의해 동작이 결정되며 외부고장시 CT포화에 의한 오동작을 막기 위하여 대전류 영역에서는 큰 비율 특성을 갖는다.

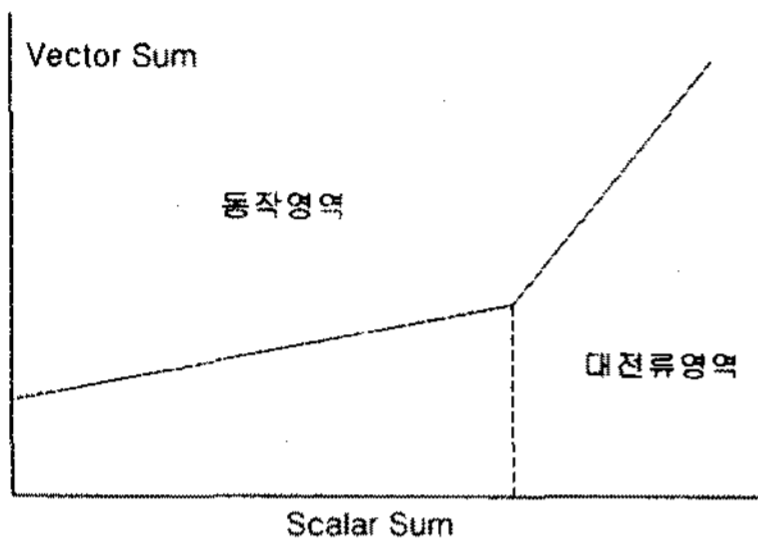


그림 6. 전류차동 특성곡선
Fig. 6. Characteristics of a differential current

2.4 UPFC 동작이 기존의 전류차동방식에 미치는 영향

그림 7에서 UPFC가 설치된 양단전원계통을 나타내었다. Relay 1과 Relay 2가 설치된 지점에서 측정된 전류 값들을 비교하여 고장 여부를 판단한다. UPFC는 실제로 O/M의 편의를 위해 선로 양 끝단 변전소에 설치될 수 있다. 이런 경우에는 UPFC가 설치된 지점에서 선로의 반대편 지점까지를 차동보호 구간으로 설정하고 기존의 전류차동방식을 그대로 적용하면 된다. 하지만 UPFC가 선로의 중간에 설치되면 UPFC 설치 점을 기준으로 계통 변수가 변하기 때문에 기존의 방식을 그대로 적용하면 계전기가 오동작을 일으킬 수 있다. 즉 UPFC가 송전선로의 중간에 설치된 경우가 바로 차동보호방식을 적용하기 가장 어려운 경우이므로 본 논문에서는 UPFC가 선로 중간에 설치되었다고 가정하였다.

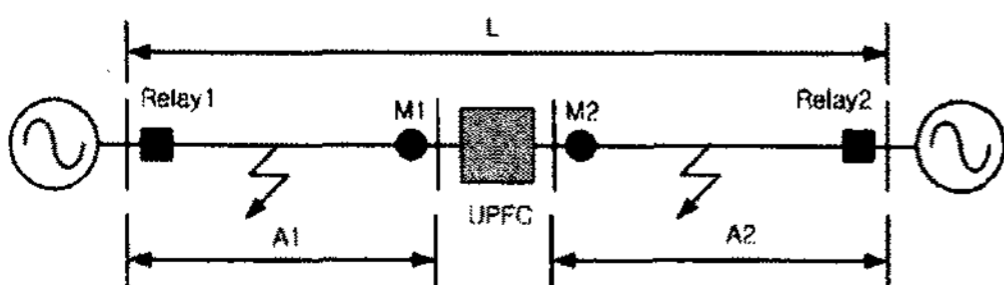


그림 7. UPFC가 설치된 양단전원계통
Fig. 7. Two-source power system with UPFC

그림 8에서는 정상시 부하전류와 외부 고장시 전류차동계전기의 동작 궤적을 나타내었다. 정상시에도 UPFC의 동작에 의하여 송전점 및 수신점 양단의 전류 벡터가 바뀔 수 있다. 하지만 기존 방식에 따라 선로 전체 L을 전류차동계전기의 내부고장 범위로 설정할 경우, UPFC 운전으로 양단 전류의 위상각이 틀어져 차동전류 벡터값이 변하여 고장이 아님에도 전류차동계전기는 고장으로 판정하게 된다. 즉 그림 8에 아래 부분에 있는 화살표와 같이 동작 궤적이 동작영역 안으로 들어가 오동작 할 수도 있다.

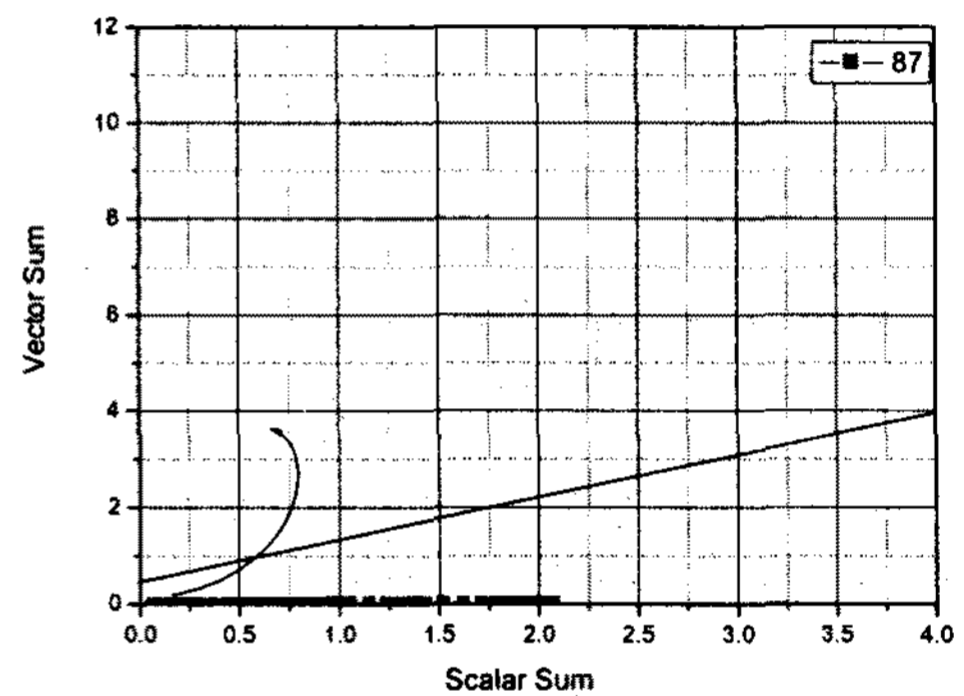


그림 8. 전류차동계전기의 동작 궤적
Fig. 8. Operational curves of a DCR

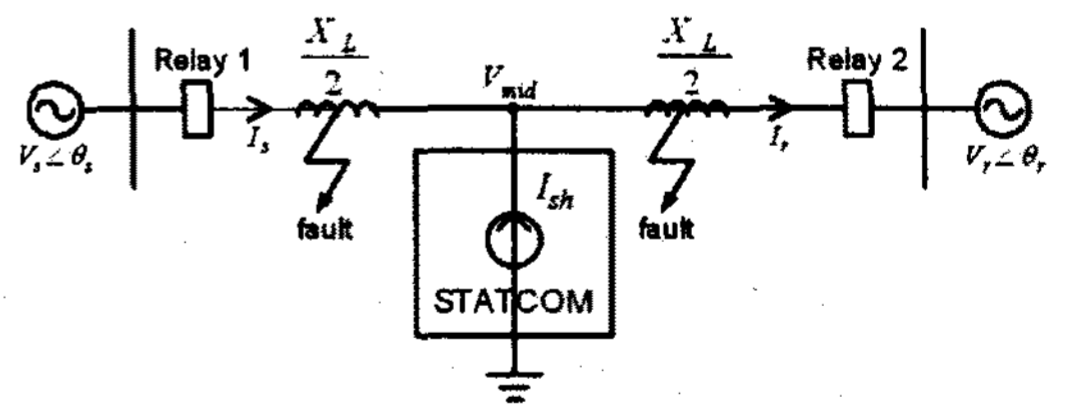


그림 9. STATCOM모드 동작시 전류차동방식 적용
Fig. 9. DCRM in case of STATCOM mode

2.4.1 UPFC가 STATCOM 모드로 동작시

UPFC의 병렬부분은 전압원과 임피던스가 직렬로 연결된 형태이지만, 이를 UPFC의 설치 모선의 전압을 일정한 값으로 유지시키기 위하여 필요한 전류원으로 볼 수 있으므로, 그림 9에서와 같이 설치 모선 전압인 V_{mid} 와 $\pm 90^\circ$ 위상차를 갖는 전류원으로 나타낼 수 있다. 따라서 수신단으로 흘러들어

는 전류(I_r)는 송전단에서 나오는 전류 (I_s)와 병렬전류원에서 주입되는 전류 (I_{sh})의 벡터 합이 된다. 따라서 UPFC를 STATCOM 모드로 운전하면 병렬전류원 I_{sh} 에 따라 I_s 및 I_r 사이에는 크기 및 위상차가 발생되기 때문에 전류차동전류계전기가 평상시에도 고장으로 오동작할 가능성이 있다.

2.4.2 UPFC가 SSSC 모드로 동작시

UPFC를 SSSC 모드로 동작시킬 경우에는 그림 10에서 알 수 있듯이 평상시에는 SSSC가 직렬 커패시터나 리액터처럼 동작하므로 이론상 전류 I_s 와 전류 I_r 가 같다. 따라서 SSSC 모드로 운전할 경우에는 기존의 차동전류방식을 그대로 적용해도 된다.

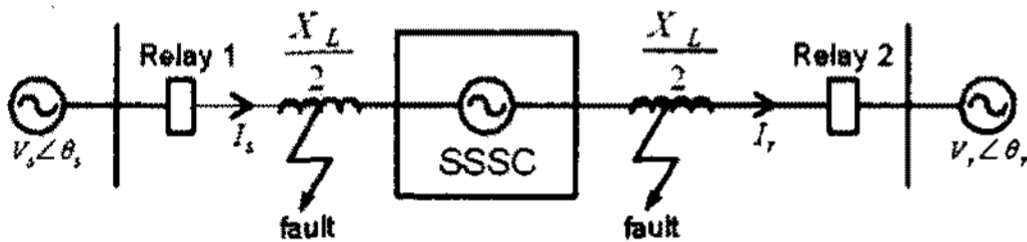


그림 10. SSSC 모드 동작시 전류차동방식 적용
Fig. 10. DCRM in case of SSSC mode

2.4.3 UPFC가 UPFC 모드로 동작시

UPFC 모드로 동작할 경우에는 그림 11에서 알 수 있듯이 설치 모선의 전압을 일정하게 유지하고 직렬 전압원에서 필요한 유효전력을 공급하기 위하여 필요한 전류가 병렬전류원으로부터 모선으로 주입되기 때문에 수전단으로 흘러들어가는 전류(I_r)는 송전단에서 나오는 전류 (I_s)와 병렬전류원에서 주입되는 전류(I_{sh})의 벡터 합이 된다. 이는 STATCOM 모드와 같이 I_s 및 I_r 사이에 크기 및 위상의 차이가 발생할 수 있다. 따라서 UPFC 모드로 운전시 전류차동계전기가 평상시에도 고장으로 판정할 오동작의 가능성이 있다.

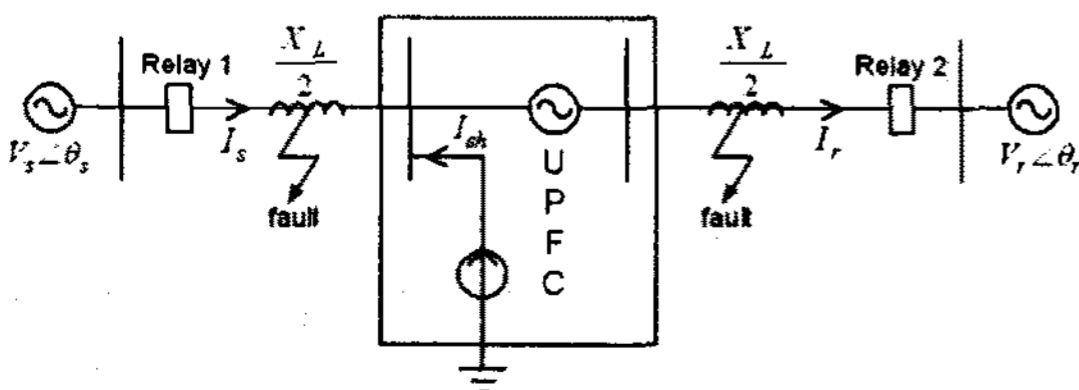


그림 11. UPFC 모드 동작시 전류차동방식 적용
Fig. 11. DCRM in case of UPFC mode

2.5 UPFC 동작을 고려한 전류차동방식 개선

앞 절에 언급한 오동작을 막기 위하여 그림 7에서와 같이 UPFC가 설치된 지점을 중심으로 좌측과 우측 지점인 M1과 M2에서의 전류를 취득하여 선로 양단의 계전기에게 전류정보를 전송한다. UPFC의 좌측 구간 A1에서는 전원단에 설치된 계전기 Relay1에서의 차단 전류와 M1에서 취득된 전류를 가지고 A1 구간만을 전담하여 고장여부를 판단하는 기능을 추가로 수행하면 된다. UPFC의 우측구간 A2에서도 마찬가지로 A2 구간만의 고장 여부를 판단하는 기능을 추가로 수행하게 되면 UPFC 운전에 대한 영향을 받지 않고 고장 유무와 고장 구간을 정확히 판별해 낼 수 있다. 물론 고장이 확인되면 선로 트립은 당연히 선로 전체 구간 L에 대해서 이루어져야 한다.

즉 기존의 구간 L에서의 고장 판단 기능에 부가적으로 각 설치점으로부터 UPFC가 설치된 지점까지의 구간만의 고장여부를 판단하는 기능을 부과하였다. 전체 구간 L에 대하여 고장으로 판단하였다 하더라도 구간 A1과 구간 A2에 대해 각각 고장으로 판단하지 않은 경우에는 UPFC 동작에 의한 전류의 변화이지 실제 고장이 아니기 때문에 트립하지 않도록 해야 한다. 고장판단구간 L, A1, A2에서의 고장 판단 여부에 대하여 실제 고장인지, 고장이 발생했다면 어느 위치인지를 알 수 있도록 개선한 전류차동 알고리즘을 아래에서 정리하였다.

실제로 고장이 발생한 경우인 CASE 1과 CASE 2를 모두 포함하도록 진리도표(Logic Diagram)를 표현하면 그림 12와 같다.

- CASE 1 : (A1 구간 고장 판단) AND (A2 구간 고장 아님 판단) AND (전체구간 L 고장 판단) --> A1 구간 고장
- CASE 2 : (A1 구간 고장 아님 판단) AND (A2 구간 고장 판단) AND (전체구간 L 고장 판단) --> A2 구간 고장

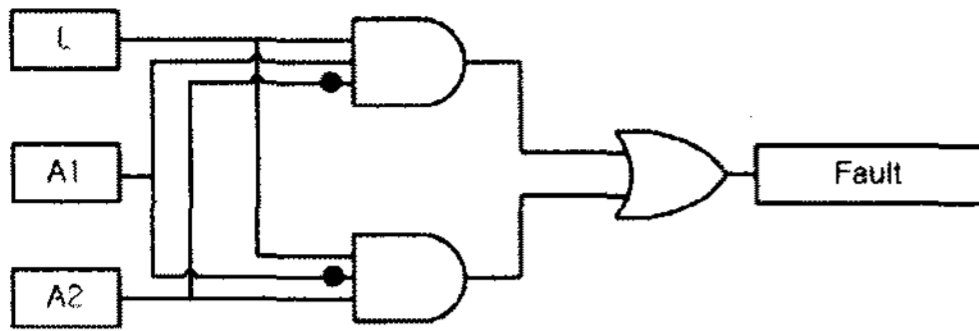


그림 12. 실제 고장이 발생한 경우
Fig. 12. Cases with faults

CASE 3은 실제로는 고장이 아니지만 UPFC 동작으로 전체구간 L에서 보면 고장으로 판단하는 경우이고 CASE 4는 UPFC가 동작을 하지 않았고 또한 실제로 고장도 발생하지 않은 경우이다. 이러한 경우들은 고장으로 판단해서는 안 된다. 이를 진리도표(Logic Diagram)로 표현하면 그림 13과 같다.

CASE 3 : (A1구간 고장 아님 판단) AND (A2구간 고장 아님 판단) AND (전체 구간 L 고장 판단) -> 선로 고장 아님, UPFC 동작

CASE 4 : (A1구간 고장 아님 판단) AND (A2구간 고장 아님 판단) AND (전체 구간 L 고장 아님 판단) -> 선로 고장 아님, UPFC 미동작

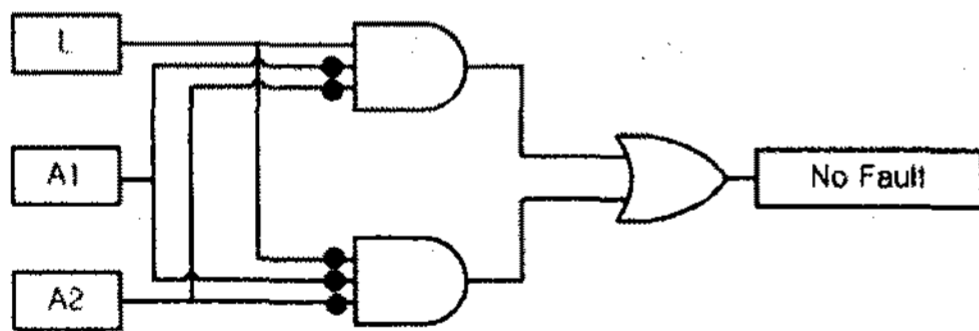


그림 13. 실제 고장이 발생하지 않은 경우
Fig. 13. Cases without faults

사례연구로서 UPFC 모드(직렬전압원 크기 0.3[p.u.] 위상 60도)로 동작하고 있을 때, A1 구간 내에 있는 전체 선로의 0.2[p.u.]가 되는 지점에서 완전 지락고장 발생시 전류차동계전기의 동작을 살펴보았다.

그림 14를 통해 A1 구간에서는 고장으로, 그림 15를 통해 A2 구간에서는 고장이 아니므로, 그림 16을 통해 전체구간 L에서는 고장으로 각각 판단함을 알 수 있다. 이는 A1 구간에서 고장이 발생했음을 의미하고, 이로써 제안한 방법의 유효성이 입증되었다.

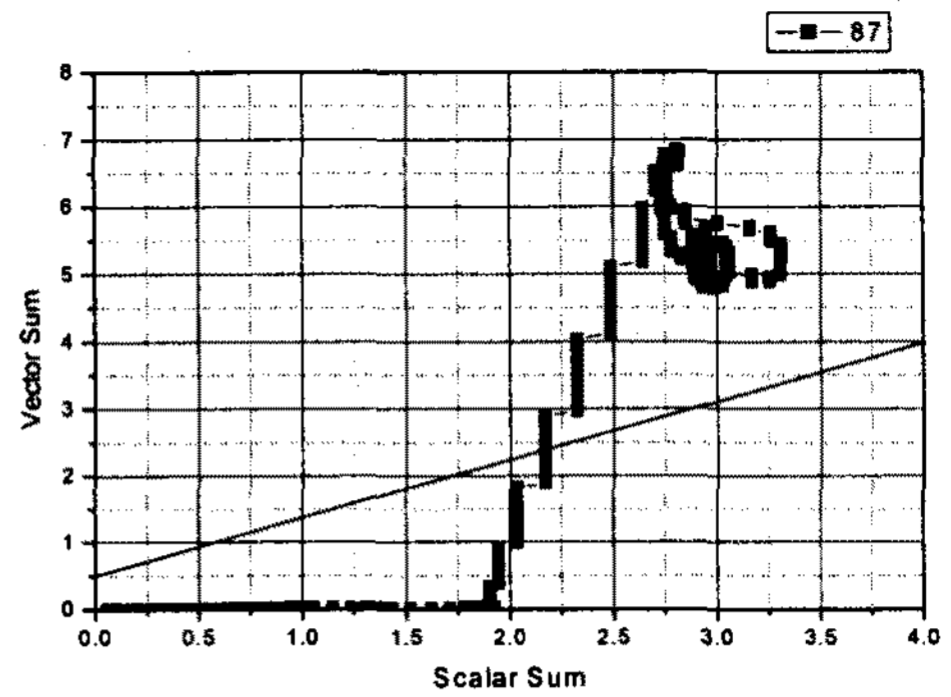


그림 14. A1 구간에서의 고장 판단 결과
Fig. 14. Fault detection in A1

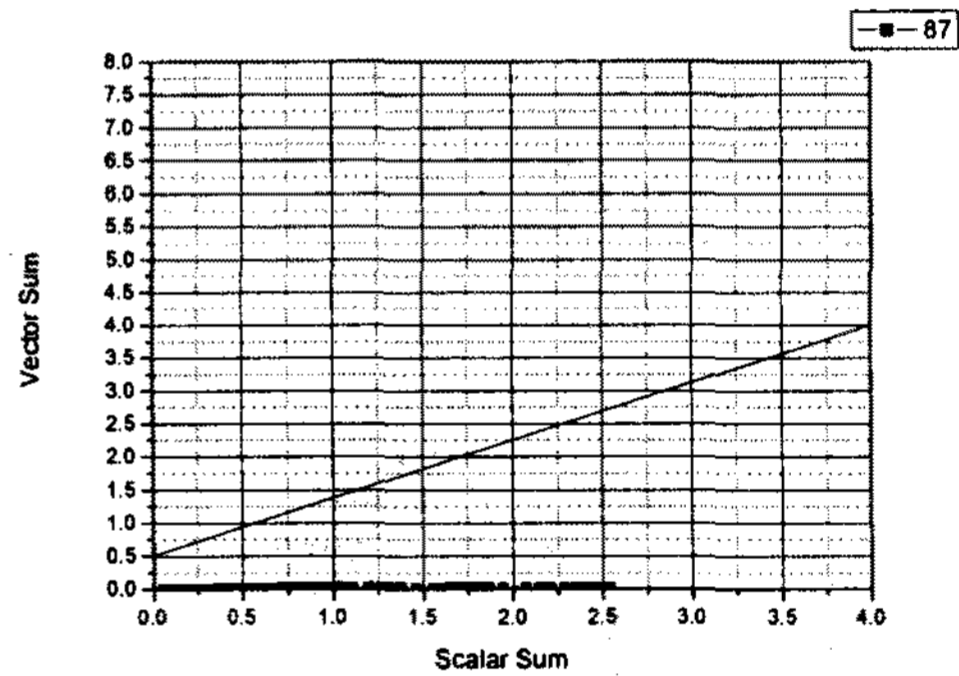


그림 15. A2 구간에서의 고장 판단 결과
Fig. 15. Fault detection in A2

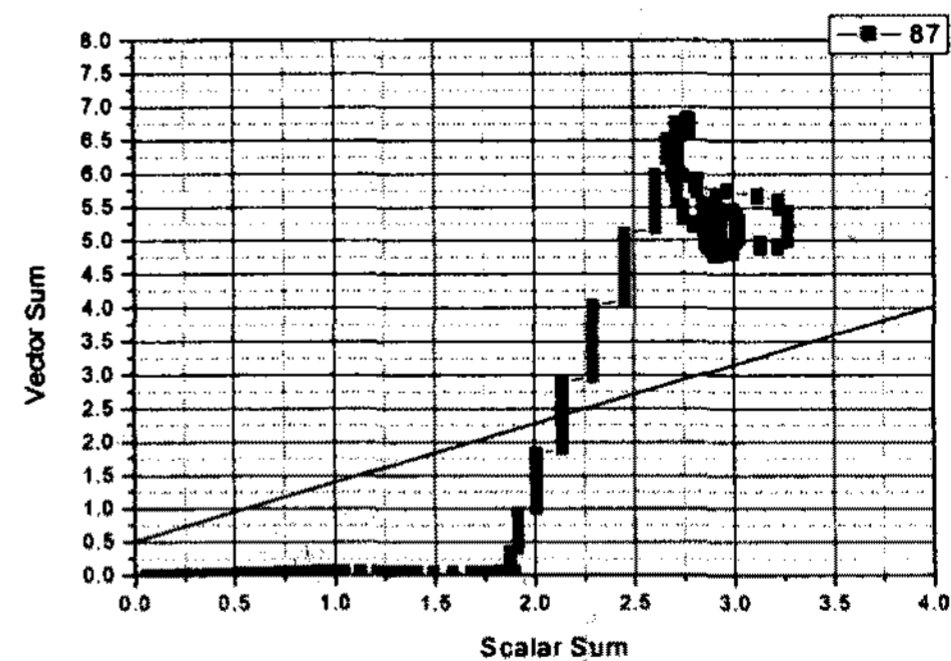


그림 16. 전체구간 L에서의 고장 판단 결과
Fig. 16. Fault detection in L

UPFC가 앞에서 제시한 것과 같은 조건에서 동작하고 있을 때 A2 구간 내의 전체 선로의 0.8[p.u.]가 되는 지점에서 완전지락고장을 발생시키고 계전기의 동작을 관찰하였다. 그림 17, 18, 19를 통하여 각

UPFC를 포함한 송전선에서의 전류자동 보호 방식의 개선

각 A1 구간 고장아님, A2 구간 고장, 전체구간 L에 대해서는 고장으로 판단함을 알 수 있다. 이는 A2 구간 내부에서 고장이 발생했음을 의미하고 이로써 제안한 방법의 유효성이 입증되었다.

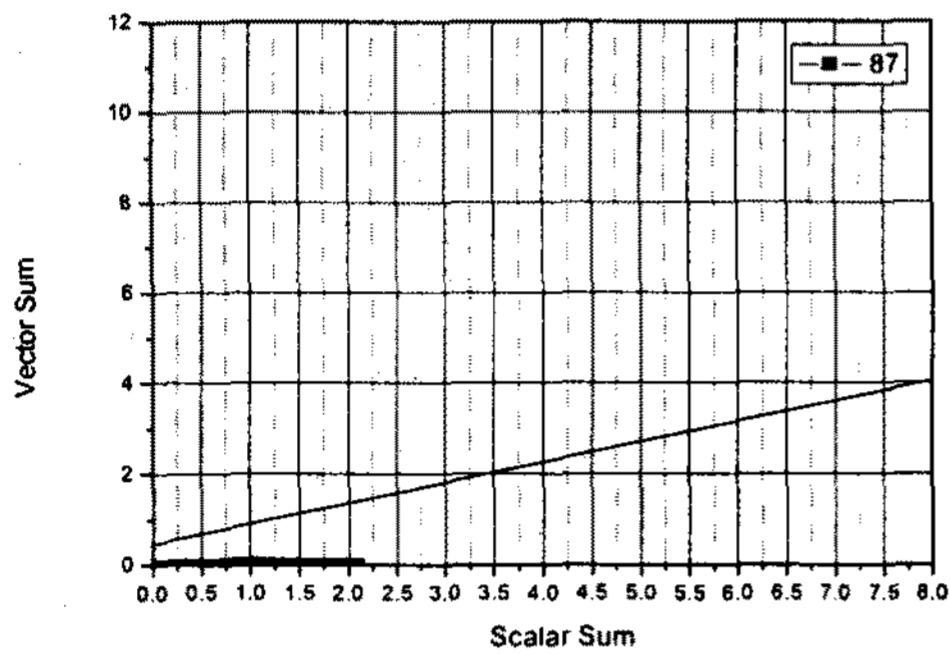


그림 17. A1 구간에서의 고장 판단 결과
Fig. 17. Fault detection in A1

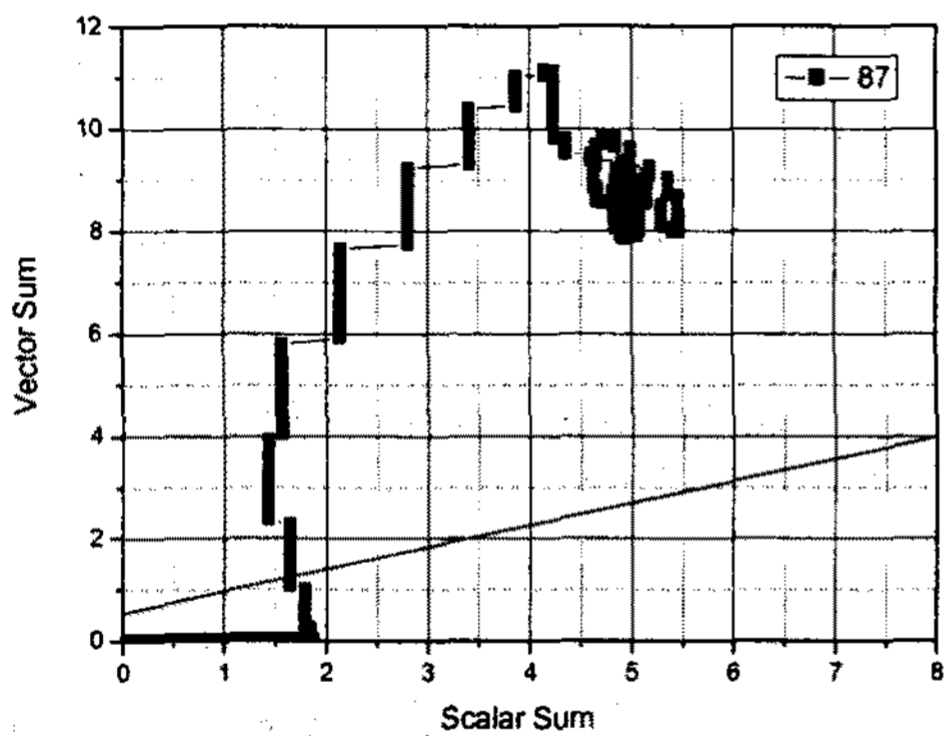


그림 18. A2 구간에서의 고장 판단 결과
Fig. 18. Fault detection in A2

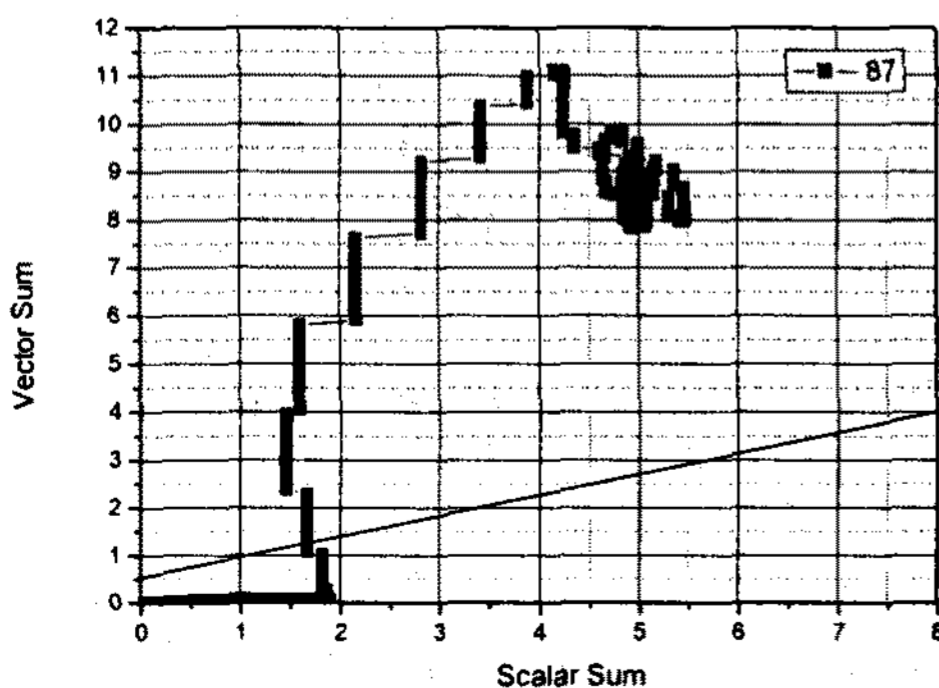


그림 19. 전체구간 L에서의 고장 판단 결과
Fig. 19. Fault detection in L

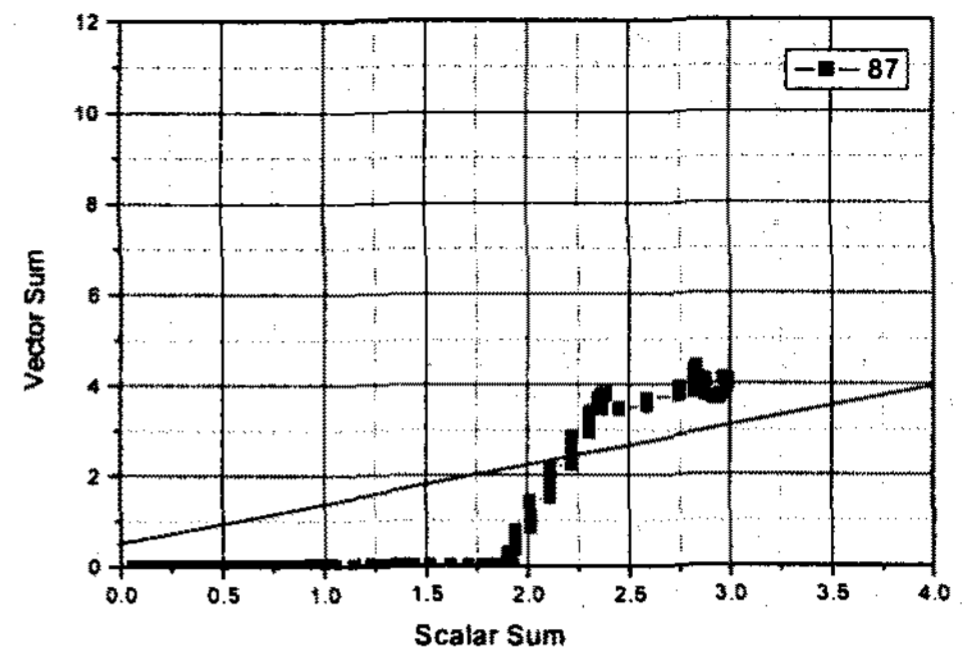


그림 20. A1 구간에서의 고장 판단 결과
Fig. 20. Fault detection in A1

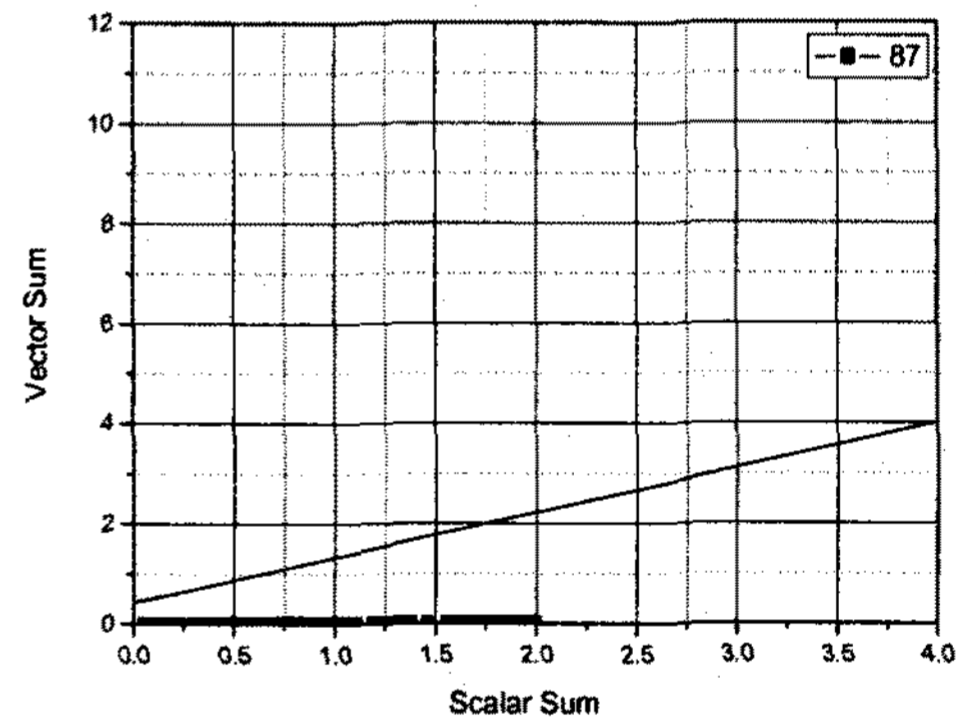


그림 21. A2 구간에서의 고장 판단 결과
Fig. 21. Fault detection in A2

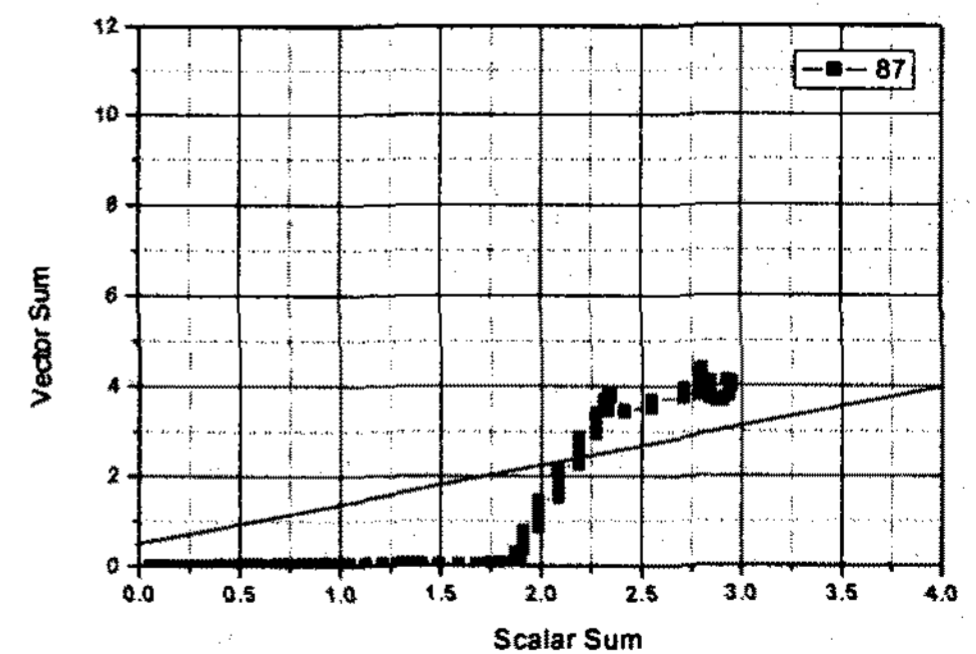


그림 22. 전체구간 L에서의 고장 판단 결과
Fig. 22. Fault detection in L

제안된 방법은 고장저항이 있는 경우에도 정확하게 고장여부를 판단할 수 있다. 이전의 UPFC 운전 조건에서 선로의 0.2[p.u.](A1 구간) 지점에서 고장

저항 10[Ω]의 지락고장을 발생시켜 계전기의 동작을 관찰하였다. 그림 20, 21, 22에서 알 수 있듯이 구간 A1에서의 고장으로 정확하게 판단함을 알 수 있다. 완전지락고장에 비해 고장저항이 양단 차동전류의 크기는 작아졌지만 여전히 벡터 차이가 발생하므로 고장 판단에는 큰 영향이 없었다. 즉 고장저항과 관계없이 제안한 방법의 유효성이 입증되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 계통 보호 측면에서 UPFC가 포함된 송전계통에 대한 동적 해석을 통하여 UPFC가 계통 중간에 설치되었을 경우에 송전선 보호를 위한 기존의 전류차동 계전방법을 개선하였다.

기존의 전류차동계전방식을 UPFC가 포함된 송전계통에 그대로 적용하면 UPFC가 STATCOM 및 UPFC 모드로 동작할 경우에 평상시에도 계전기가 오동작할 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 전류차동계전방법에서는 UPFC가 설치된 선로에 대해서 UPFC 양단에서의 전류 값들을 추가로 측정하여 UPFC를 기준으로 전후로 구간을 나누어 각각의 구간에서의 고장여부를 판단하는 기능을 추가하였다. 이로써 UPFC의 동작여부와 관계없이 고장을 정확하게 판단할 수 있다. 또한 제안된 방법은 고장저항이 있는 지락고장에도 유효하다. 본 논문에서 제안한 방법에 대한 유효성은 UPFC 포함 양단전원 계통에서의 시뮬레이션을 통해 입증되었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-275)주관으로 수행된 과제임.

References

- [1] Clark W. Gellings, Marek Samotyj, and Bill Howe, "The Future's Smart Delivery System," IEEE Power & Energy, Vol.2, No.5, Sep./Oct. 2004, pp.40-48.
- [2] P.K. Dash, A.K. Pradhan, Ganapati Panda, And A.C. Liew, "Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission Systems(FACTS)," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.15, No.1, Jan., 2000, pp. 38-43.
- [3] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS, 2000, IEEE Press.
- [4] M.H. Haque, "Optimal Location of Shunt FACTS Devices in Long Transmission Lines," IEE Proceedings - Generation, Transmission, and Distribution, Vol.147, Issue 4, July 2000, pp.218 - 222.
- [5] Final Report, "A Study on Establishment of Protective Relay Setting Rules," June 2003, pp.17-30.

◇ 저자소개 ◇

임정욱 (林正煜)

1970년 9월 27일생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 서울대 전기공학부 대학원 졸업(석사). 2002년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2005년 현재 명지대학교 전기공학과 연구교수.

권영진 (權寧珍)

1974년 10월 16일생. 2000년 명지대 전기공학과 졸업. 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 차세대 전력기술연구센터 연구원이자 동 대학원 박사과정.

Thordur Runolfsson

1983년 University of Wisconsin 전기컴퓨터공학 및 수학전공 졸업. 1988년 University of Michigan, Ann Arbor 전기공학부 졸업(박사). 현재 University of Oklahoma 전기컴퓨터공학부 교수.