

배전계통에 연계된 열병합발전 시스템의 개선된 보호협조 방안에 관한 연구

論 文
49A-6-5

Advanced Protective Coordination Schemes of Utility Interconnected Cogeneration Systems

崔峻豪*·鄭聖教**·秋東旭*·金洛京*·孫學植*·金載哲***

(Joon-Ho Choi · Sung-Kyo Jung · Dong-Woog Choo · Nark-Kyung Kim · Sag-Sig Son · Jae-Chul Kim)

Abstract - Recently, there has been growing interest in utilizing cogeneration(COGEN) systems with a high-energy efficiency due to the increasing energy consumption and the lacking of energy resource. But an insertion of COGN system to existing power distribution system can cause several problems such as voltage variations, harmonics, protective coordination, increasing fault current etc, because of reverse power of COGN, especially in protective coordination. A study on a proper coordination with existing one is being required. The existing power distribution system is operated with radial type by one source and protection system is composed based on unidirectional power source. But an Insertion of COGN system to power distribution system change existing unidirectional power source system to bidirectional power source. Therefore, investigation to cover whole field of power distribution systems must be accomplished such as changing of protection devices rating by increasing fault current, reevaluation of protective coordination. In this paper, simulation using PSCAD/EMTDC was accomplished to analyze effect of COGN on distribution fault current. Also, the existing protection system of 22.9[kV] power distribution system and customers protection system to protect of COGN was analyzed and the study on protective coordination between of two protection system accomplished.

Key Words : Cogeneration, Protective coordination, Recloser, Sectionalizer, Faults current, Power distribution systems, PSCAD/EMTDC

1. 서 론

최근 산업의 발달 및 생활수준의 향상으로 인해 전력에너지의 수요가 급증하고 있으며 이러한 전력수요에 대처하기 위한 발전설비 확충계획에 따른 막대한 소요자금, 발전설비를 위한 부지 확보 난 및 환경오염 등의 문제가 대두되고 있다. 특히 우리 나라의 경우 자원이 빈궁하여 상당량의 에너지 자원을 수입에 의존하고 있으며 향후 에너지 수급 또한 점차 어려워질 전망이므로 대규모 발전설비 건설을 위한 부지확보 난과 환경문제 등에 대응하기 위해 에너지 이용률의 극대화를 위한 대책의 하나로 열병합발전 시스템에 대한 관심이 한층 더 고조되고 있다. 하지만 이러한 열병합발전 시스템은 배전계통과의 연계 및 분리 운전시 전압변동 및 고조파, 보호협조, 단락용량의 증가 등과 같은 문제점을 일으킬 수 있으며 이러한 문제점은 첨단산업의 발달과 함께 많이 보급된 컴퓨터 및 산업용 정밀 기기와 같이 신뢰성 (Reliability) 및 품질

(Quality) 면에서 양질의 전력을 요구하는 수용가 측 설비에 악영향을 미칠 우려가 있을 뿐 아니라 배전계통의 운전, 보호 및 제어에 있어서 복잡성을 증가시킨다[1-2]. 특히 보호협조에 있어서는 문제 발생 시 그 과급효과가 열병합발전 시스템 자체뿐 아니라 배전계통의 다른 인근 수용가들에게까지 큰 악영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 선행 연구가 반드시 필요한 실정이다[3-4]. 미국, 일본과 같은 선진국의 경우 이미 이 분야에 대한 연구가 활발히 이루어 졌으며 또한 관련 가이드라인을 제시하고 있다. 미국의 경우 발전설비 용량에 따른 열병합발전 시스템의 보호시스템을 제시하고 있으며 일본의 경우 열병합발전 시스템에 의한 역조류의 유·무에 따른 보호시스템에 대한 가이드라인을 제시하고 있다 [5-6]. 하지만 우리 나라의 경우 현재 사용하고 있는 우리 배전계통의 특성에 맞는 보호시스템에 관한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

우리 나라의 경우 기존의 22.9 [kV] 배전계통은 루프 (Loop)운전을 하고 있는 송전시스템과는 달리 단방향 전원에 의해 방사상(Radial)으로 운전되고 있으며 보호시스템 또한 단방향 조류에 기초하여 구성되고 있다. 하지만 이러한 배전계통에 열병합발전 시스템이 도입된다면 기존의 단방향 전원에서 양방향 전원 시스템으로의 전환에 따라 사고전류의 증가에 따른 보호기기 정격의 수정, 보호협조의 재구성 등과 같은 배전계통 전반의 보호시스템의 적합성에 대한 검토가 이

* 正 會 員 : 崇實大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 기인 시스템 研究員

*** 正 會 員 : 崇實大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 3月 13日

最終完了 : 2000年 5月 22日

루어져야 하며 열병합발전 시스템이 연계됨에 따라 현 배전계통 보호시스템을 구성하고 있는 리크로저(Recloser) 및 구분개폐기(Sectionalizer)와의 협조에 있어서 발생할 수 있는 문제점에 대한 충분한 연구가 필요하다. [7]에서는 분산전원의 배전계통 연계시 보호시스템의 하나로 간선이 없는 전용선의 경우 선로 양단의 전류를 비교하여 사고를 감지하는 차동계전기를 이용한 방법을 제안하고 있다. 하지만 이러한 방식은 현 배전계통의 피더가 여러 개의 간선과 수용가들을 포함하고 있음을 고려할 때 사고검출에 어려움이 있을 뿐 아니라 전용선로 외부나 인근선로 사고 시 사고위치의 구분이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 보호협조 측면에서 열병합발전 시스템이 연계된 선로 사고 시 열병합발전 시스템을 배전계통으로부터 분리하고 인근선로 사고 시 연계운전을 지속하는 것이 바람직하므로 사고 시 재폐로 동작에 따른 전압, 전류의 특징을 이용하여 연계선로와 인근선로에서의 사고를 구분하고 이를 바탕으로 배전계통 및 열병합발전 시스템 설치 수용가 측 보호기기들을 협조시키고자 한다.

본 논문에서는 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 통하여 열병합발전 시스템이 배전계통에 연계시 사고전류에 미치는 영향을 분석을 하고 기존의 22.9[kV] 배전계통 보호시스템 및 열병합발전 시스템 연계시 수용가 측 보호시스템의 타당성을 분석하였으며 열병합발전 시스템의 배전계통 연계시 리크로저 및 구분개폐기와의 협조에 있어서 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 수용가 측 보호기기의 협조방법을 제시하였다. 또한 전력계통 사고 시 다양한 크기의 사고저항에 따른 사고전류 및 전압강하의 다양성은 보호기기의 정정치 만에 의한 적절한 보호협조의 구성을 어렵게 하므로 열병합발전 시스템 연계선로 및 인근선로 사고 시 각각의 전압, 전류특성 분석을 통해 사고선로를 구분하고 이를 토대로 각각의 보호시스템이 상호 협조를 이루기 위한 협조방안에 관한 연구를 하였다.

2. 기존 단방향 배전계통에서의 보호협조

열병합발전 시스템의 배전계통 연계시 보호시스템을 분석하기 위해서는 우선 현 배전계통 운전형태 및 특성, 보호시스템 등에 대한 분석이 선행되어야 한다. 우리나라의 경우 22.9 [kV]의 중성점 다중접지 방식의 배전계통을 채택하고 있으며 본 장에서는 이러한 배전계통에서 채택하고 있는 보호기기 및 보호시스템의 특성에 대해 분석하고자 한다[8]

2.1 배전계통 보호기기

배전계통은 여러 개의 전원이 연결된 루프(Loop) 형태의 운전을 하고 있는 송전시스템과는 달리 단일 전원에 의한 방사상(Radial) 운전을 하고 있으며 보호시스템 또한 이러한 특성에 적합하도록 구성되어 있다. 보호시스템은 배전용 변전소 및 모선, 배전용 피더 사고시 정전시간 및 정전구간을 최소화하고 전력용 기기 들을 보호하기 위해 각 계전기를 포함한 리크로저, 구분개폐기, 퓨즈 등의 보호기기들이 서로 적절한 협조를 이루도록 구성되어 있다. 본 절에서는 배전선로에서 사용되는 주된 보호기기인 리크로저와 구분개폐기를 설명하고자 한다.

2.1.1 리크로저(Recloser)

리크로저는 배전계통 보호기기 중 전위와 후비 보호장치사이의 보호협조를 이루게 하는 기본적인 역할을 담당하며 순간 사고 시 선로를 순시로 차단한 후 자동으로 재폐로 함으로써 전력공급의 신뢰도를 향상시키며 영구 사고 시 설정된 동작 후 고장구간을 배전계통으로부터 분리시키는 기능을 갖는다. 즉, 순간 사고와 영구 사고를 구별할 수 있는 기능을 가진 보호기기이며 동작 특성을 위한 순시동작곡선과 지연동작곡선을 가지며 총 4회까지 정정이 가능하다. 그림 1은 사고발생 시 사고전류의 형태를 통해 리크로저의 동작을 나타내고 있다.

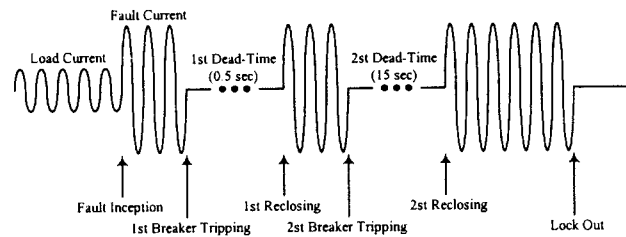


그림 1 리크로저 동작에 의한 사고전류 파형
Fig. 1 Fault current waveform by reclosing operation

2.1.2 구분개폐기(Sectionalizer)

구분개폐기는 후비 보호장치인 리크로저의 동작횟수를 카운트하여 동작하며 리크로저 동작에 의해 선로가 무전압 상태가 되었을 때 고장구간을 분리하므로 일반적으로 후비 보호장치와 직렬로 연결하여 사용한다. 즉 구분개폐기는 자동으로 제어되는 배전선로의 개폐기이며 고장전류를 차단할 수 있는 능력은 없으므로 T-C 특성이 불필요하여 다른 보호장치와 협조를 이루기가 용이하다. 그 동작에 있어서는 최소동작전류 이상의 전류가 흐르면 리크로저의 동작을 카운트 할 준비를 하며 후비 보호장치인 리크로저가 동작을 시작하면 그 동작회수를 카운트하여 동작하게 된다.

2.2 시스템 모델

기존 배전계통의 보호시스템 및 열병합발전 시스템 연계시 보호협조 상태를 분석하고 연계된 열병합발전 시스템이 사고 시 사고전류에 미치는 영향 등을 분석하기 위해서는 우선 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 시스템 모델에 대한 정확한 이해가 필요하며 그 모델은 다음과 같다.

2.2.1 배전계통 모델

배전계통 모델은 먼저 상위계통인 송전계통을 등가화한 무한모선(이상전원)과 배전용 변압기, 모선, 선로, 부하 등으로 구성하였고 그림 2는 배전계통 모델의 단선도를 나타내었으며 표 2는 시뮬레이션을 위해 사용된 배전계통 모델의 입력 파라메타를 나타낸다.

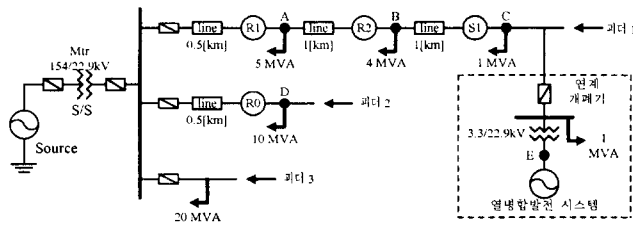


그림 2 배전계통 모델 단선도
Fig. 2 One-line diagram of the power distribution system model

표 1 배전계통 모델 입력 파라메타
Table 1 Input parameters of the power distribution system model

전원측	정상분 임피던스 (Z_{s0}) [%]	0.257+j1.336
	정상, 역상분 임피던스 (Z_{s1}, Z_{s2}) [%]	0.072+j0.757
배전용 변전소 주변압기	정격 용량 [MVA]	45/60
	임피던스 (Z) [%]	j11
배전선로 ACSR 160	정상분 임피던스 (Z_b) [%/km]	11.99 + j29.26
	정상, 역상분 임피던스 (Z_{L1}, Z_{L2}) [%/km]	3.47 + j7.46
	선로 길이 [km]	10
열병합 발전 시스템	발전기 종류	동기발전기
	정격 용량 [MW]	2
	정격 전압 [kV]	3.3
피더	수	4개

2.3 배전계통 모델의 보호시스템

기존 배전계통 보호시스템의 구성 및 동작상황을 분석하기 위해 현재 배전계통에서 적용되고 있는 규정에 따라 그림 2의 배전계통 모델의 보호시스템을 구성하였다. 열병합발전 시스템의 연계위치는 수용가 측의 위치를 고려할 때 배전선로(D/L)에 연계된다고 가정하는 것이 일반적으로 타당하다. 따라서 열병합발전 시스템 연계를 위한 배전계통 모델의 보호시스템은 그림 2의 피더1과 같이 채폐로 방식을 채택하고 있는 배전선로(D/L)를 중심으로 구성하였다. 보호시스템은 배전용 변전소 근방의 사고를 위한 계전기들과 배전선로(D/L)에서의 사고 시 보호를 위한 2대의 리크로저와 1개의 구분개폐기가 사용되었으며 그림 2의 피더1은 그 형태를 나타낸다. 표 2는 보호시스템에 사용된 리크로저의 설정치를 나타내며 리크로저의 동작시간은 차단기 동작의 기계적 지연 시간을 각각 5[cycles]씩 고려된 값이다.

표 2 리크로저 R1, R2의 설정치
Table 2 Setting of recloser R1, R2

보호기기	정정치	순시동작(F) [cycles]	지연동작(D) [cycles]	Sequence
리크로저 R1		2.64+5	4.2+5	1F1D
리크로저 R2		3.64+5	3.9+5	1F1D

3 열병합발전 시스템의 배전계통 연계에 따른 문제점

3.1 사고전류의 증가에 따른 문제점

배전계통 보호시스템을 구성하는 보호기기의 정격 및 정전

치는 사고전류의 크기와 매우 밀접한 관계가 있으며 이러한 사고전류의 크기는 사고지점에서 본 계통의 전원, 변압기, 선로 등의 등가 사고임피던스의 크기에 따라 그 값이 결정된다. 따라서 배전계통의 보호시스템을 구성하기 위해서는 먼저 배전계통의 구성형태를 고려한 사고해석이 먼저 이루어져야 한다.

3.1.1 단방향 전원에서의 사고해석

단방향 전원에 의해 방사상으로 운전되고 있는 기존 배전계통의 사고해석을 위해 그림 2의 시스템 모델을 이용한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였으며 사고는 3상 단락사고로 가정하였다. 사고 위치는 피더A 5[km] 지점이며 0.2초에 발생하는 것으로 모의하였다. 식(1)과 (2)는 배전계통 모델의 입력 파라메타를 이용한 사고전류 계산 예를 보여주며 그림 3은 PSCAD/EMTDC를 이용한 사고해석 시뮬레이션 결과를 보여준다[9].

$$I_{3S} = \frac{100}{Z^+} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \cdot V} = 4272[A] \quad (1)$$

$$I_{3S, peak-peak} = I_{3S} \times \sqrt{2} = 6041[A] \quad (2)$$

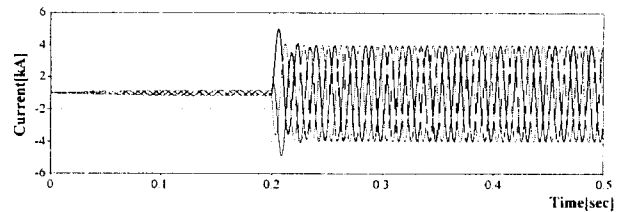


그림 3 3상 단락사고 시 사고전류 파형
Fig. 3 Fault current waveform by three phase fault

3.1.2 양방향 전원에서의 사고해석

양방향 전원에 의해 운전되고 있는 배전계통의 사고해석을 위한 시스템 모델은 단방향 전원에 의한 사고해석에서와 같이 그림 2의 시스템 모델이 사용되었으며 전원의 양 방향화를 위해 배전용 피더A에 열병합발전 시스템이 연계된 것으로 가정하였다. 열병합발전 시스템이 연계된 배전계통 사고 시 사고전류의 경로를 고려한 등가회로는 그림 4와 같다.

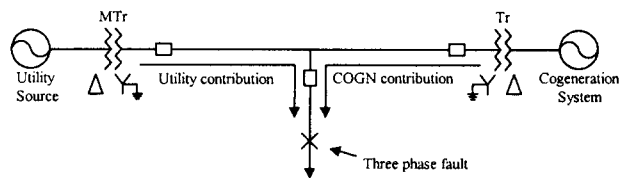


그림 4 양방향전원 시스템의 사고전류를 고려한 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit for fault current of bidirectional power source system

열병합발전 시스템이 연계된 배전계통 사고해석을 위해 그림 2의 배전계통 모델을 이용한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였으며 그림 5는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 열병

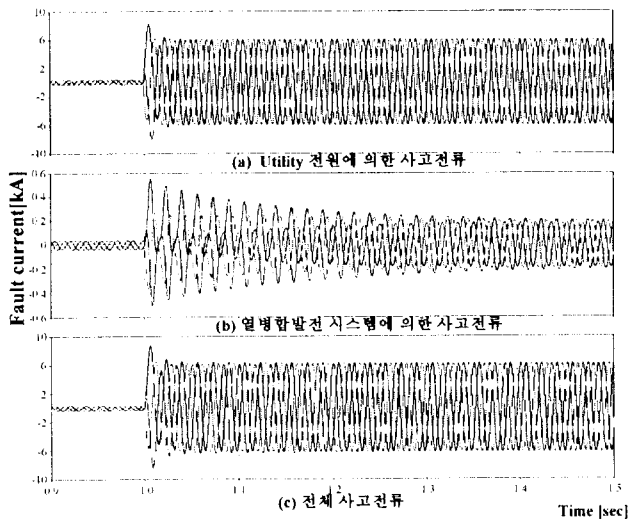


그림 5 3상 단락사고 시 사고전류 파형
Fig. 5 Fault current waveform by three phase fault

합발전 시스템 용량은 2[MW]이고 연계위치 및 사고위치는 그림 2의 A점이며 시뮬레이션 시작 1초 후에 3상 단락사고가 발생하고 사고지속시간은 영구사고로 모의하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 사고 시 열병합발전 시스템에 의해 차 과도시 580[A], 정상 상태에서 200[A] 정도의 사고전류가 증가됨을 알 수 있다.

3.2 리크로저(Recloser)와의 협조시 문제점

리크로저의 보호 영역 내에 열병합발전 시스템이 연계되었을 경우에는 사고 시 리크로저에 의해 선로가 차단되었을 때 열병합발전 시스템에 의한 단독운전이 발생할 수 있으며 이러한 상황은 수용가 측 기기에 주파수 및 전압에 있어서 저품질의 전력을 공급함으로써 전력설비에 악영향을 줄 수 있을 뿐 아니라 전력회사측 수리공이 이러한 상황을 인지하지 못할 경우 인적 사고의 가능성이 발생한다[3]. 또한 리크로저에 의해 선로가 차단된 후 다시 재투입이 이루어질 경우 배전계통과 열병합발전 시스템 사이의 비동기 투입이 이루어 질 수 있으며 이러한 상황은 배전계통 전체뿐 아니라 열병합발전 시스템 자체에 큰 악영향을 줄 수 있다[4].

3.3 구분개폐기(Sectionalizer)와의 협조시 문제점

구분개폐기는 후비 보호장치인 리크로저에 의한 선로 무전압상태를 카운트함으로써 동작하게 된다. 하지만 열병합발전 시스템이 리크로저와 구분개폐기 사이에 연계되고(그림 2의 B점) 사고가 구분개폐기 이후(그림 2의 C점)에 발생하거나 열병합발전 시스템이 구분개폐기 이후(그림 2의 C점)에 연계되고 사고가 리크로저와 구분개폐기 사이(그림 2의 B점)에 발생하였을 경우 리크로저에 의해 선로가 차단되더라도 열병합발전 시스템의 단독운전에 의해 선로 무전압 상태를 감지하는 구분개폐기의 오동작, 즉 리크로저 동작횟수의 카운트에 실패하여 선로를 차단할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 경우 리크로저에 의해 선로가 재투입되었

을 때 열병합발전 시스템의 단독운전뿐 아니라 배전계통과 열병합발전 시스템의 비동기 투입에 의한 악영향이 발생할 수 있다.

4. 열병합발전 시스템이 연계된 양방향 배전계통에서의 보호협조

미국, 일본과 같은 선진국에서는 열병합발전 시스템의 배전계통 연계운전을 위한 설치 수용가 측 보호시스템에 대한 많은 연구가 이미 진행되었으며 관련 가이드라인을 제시하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 중성점 다중접지 방식의 22.9 [kV] 배전계통과 재폐로 방식의 보호시스템을 채택하고 있으므로 이러한 특성에 맞는 보호협조의 구성이 필요하다.

열병합발전 시스템은 발전기 자체의 보호 및 배전계통 연계계를 위한 보호시스템을 포함하고 있으며 이러한 열병합발전 시스템을 배전계통에 연계하기 위해서는 기존의 배전계통 보호시스템과의 협조가 반드시 필요하다. 특히 재폐로 방식을 채택하고 있는 우리나라 배전계통의 경우 리크로저 동작에 의해 열병합발전 시스템이 악영향을 받을 수 있으며 또한 배전계통에 연계된 열병합발전 시스템에 의해 리크로저를 중심으로 구성된 배전선로 보호시스템의 오동작이 발생할 수 있으므로 이들 두 보호시스템 간의 상호 보호협조가 이루어지도록 충분한 연구를 통한 연계운전이 이루어져야 한다.

4.1 기존의 열병합발전 시스템의 보호시스템 구성

열병합발전 시스템의 배전계통 연계를 위한 수용가 측 보호시스템은 발전설비의 용량 및 배전계통 특성에 따라 보호시스템을 구성하는 보호기구나 그들의 협조에 있어서 각각 다를 수 있다. 본 논문에서는 열병합발전 시스템의 배전계통 연계운전을 위한 보호시스템으로 [5]에서 제시하고있는 보호시스템을 중심으로 우리나라 배전계통에서의 열병합발전 시스템 연계를 위한 적합한 보호협조에 관한 연구를 하였다.

그림 6은 [5]에서 제시하고 있는 배전계통 연계를 위한 열병합발전 시스템 설치 수용가 측 보호시스템을 나타낸다.

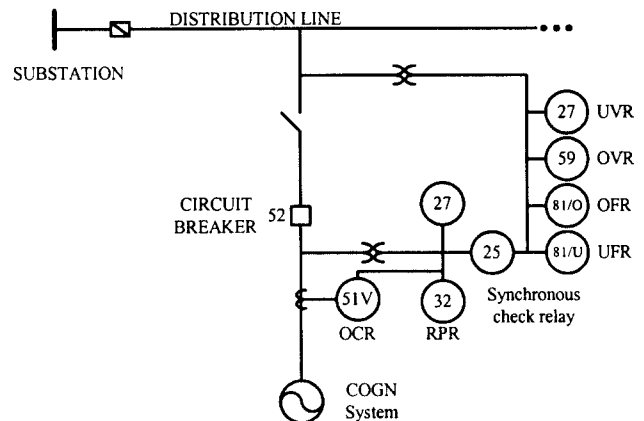


그림 6 배전계통 연계를 위한 열병합발전 시스템 측 보호시스템
Fig. 6 Protection devices of cogeneration system for interconnection with power distribution system

4.2 열병합발전 시스템의 배전계통 연계를 위한 제안된 보호협조 방안

열병합발전 시스템의 배전계통 연계운전을 위해서는 그림 6의 수용가측 보호시스템인 OVR, UVR, OCR, OFR, UFR, RPR Synchronous check relay와 같은 각각의 계전기들이 상호간 및 2.3절에서 설명된 배전계통 보호시스템과 협조를 이루어야 한다. 즉, 연계된 열병합발전 시스템이 기존 배전계통의 보호시스템에 악영향을 주지 않도록 구성되어야 한다. 열병합발전 시스템의 설치 수용가 측 보호시스템은 현 배전계통과의 협조에 있어서 연계선로 사고 시 열병합발전 시스템을 분리해야 하며 인근선로 사고 시 연계운전을 계속하는 것이 바람직하다.

4.2.1 리크로저(Recloser)와의 보호협조

재폐로 방식을 적용하고 있는 배전계통에 연계된 열병합발전 시스템은 연계선로 사고 시 리크로저 동작에 의해 악영향을 받을 수 있으며 또한 리크로저에 의해 선로 개방 후 재투입시 비동기 투입에 의해 열병합발전 시스템 자체뿐 아니라 배전계통 전체에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 열병합발전 시스템 설치 수용가 측 보호기들은 연계선로 사고 시 리크로저에 의해 선로 개방 후 첫 번째 재폐로가 이루어지기 전에 계전기들이 동작하여 열병합발전 시스템을 배전계통으로부터 분리시키도록 정정되어야 한다.

4.2.2 구분개폐기(Sectionalizer)와의 보호협조

구분개폐기는 후비 보호장치로서 리크로저의 동작횟수를 카운트하여 동작함으로써 선로를 개방하게 된다. 이 때 구분개폐기는 리크로저에 의한 선로 무전압 상태를 감지하여 동작횟수를 카운트하며 또한 사고전류 차단능력이 없으므로 무전압 상태에서 선로를 개방하게 된다. 그러나 만약 열병합발전 시스템이 리크로저와 구분개폐기 사이에 연계되고 사고가 구분개폐기 보호구간에서 발생한다면 리크로저가 선로를 개방하더라도 열병합발전 시스템에 의한 전압 및 사고전류가 남아 있다면 구분개폐기는 오동작을 할 수 있는 우려가 발생하게 된다. 따라서 이러한 상황에서는 열병합발전 시스템 수용가 측 보호기들이 사고 후 리크로저가 선로를 개방 후 재투입에 들어가기 전에 열병합발전 시스템을 배전계통으로부터 분리함으로써 구분개폐기가 리크로저의 동작횟수를 정확히 카운트 할 수 있도록 세팅해야 한다.

4.2.3 열병합발전 시스템의 연계선로 및 인근선로 사고구분 알고리즘

사고 발생 시 다양한 크기의 사고임피던스는 사고전류의 크기를 다르게 할뿐 아니라 사고전류에 의한 인근선로의 순간전압강하 크기를 다양하게 하므로 인근선로의 사고와 연계선로의 사고를 구분하는데 있어서 사고전류의 크기 및 전압강하의 크기를 사용하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 본 논문에서는 사고위치가 연계선로인지 인근선로인지를 구분하는데 있어서 사고시 발전기 단자의 전압 및 전류의 특성 및 경향을 분석하여 사고선로를 구분하고자 한다.

4.2.3.1 연계선로 사고시

연계선로 사고 시 전압·전류의 특성을 분석하기 위해 그림 2의 피더1의 R_1 과 R_2 사이에 열병합발전 시스템을 연계하고 R_1 의 보호영역인 연계점과 R_2 의 사이에 3상 단락사고를 모의하였으며 그림 7과 그림 8은 사고 시 연계된 열병합발전 시스템의 단자에서 측정된 전압·전류의 결과 파형을 나타낸다.

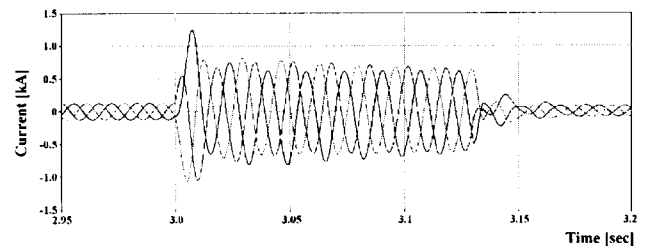


그림 7 연계선로 사고시 열병합발전 시스템의 단자전압
Fig. 7 Terminal voltage of cogeneration system on fault in interconnecting distribution line

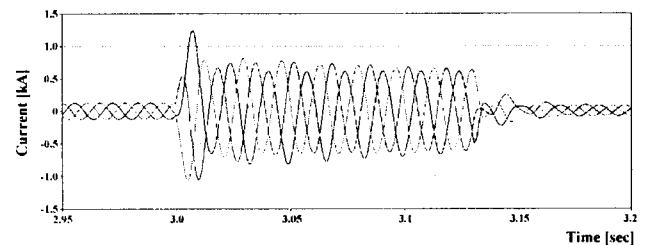


그림 8 연계선로 사고시 열병합발전 시스템측 사고전류
Fig. 8 Fault current of cogeneration system on fault in interconnecting distribution line

4.2.3.2 인근선로 사고시

인근선로 사고 시 전압·전류의 특성을 분석하기 위해 그림 2의 피더1의 R_1 과 R_2 사이에 열병합발전 시스템을 연계하고 R_0 의 보호영역인 피더2의 R_0 후단에 3상 단락사고를 모의하였으며 그림 9와 그림 10은 사고 시 연계된 열병합발전 시스템의 단자에서 측정된 전압·전류의 결과 파형을 나타낸다.

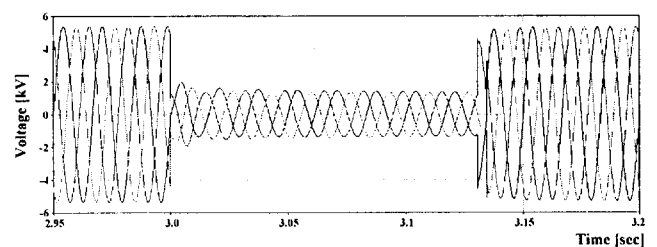


그림 9 인근선로 사고시 열병합발전 시스템의 단자전압
Fig. 9 Terminal voltage of cogeneration system on fault in neighborhood distribution line

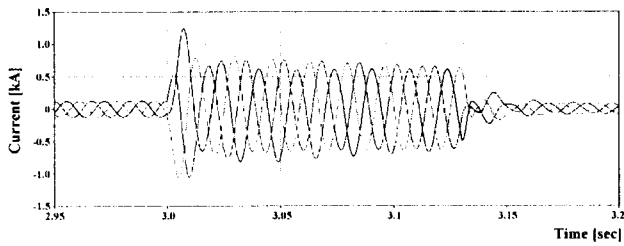


그림 10 인근선로 사고시 열병합발전 시스템의 사고전류
Fig. 10 Fault current of cogeneration system on fault in neighborhood distribution line

시뮬레이션 결과에서 인근선로 사고 시 전압은 R_0 에 의해 사고가 제거된 후 약 1[Cycle] 정도에 공칭 전압을 회복하고, 전류는 3[Cycle] 정도에 부하전류를 회복함을 알 수 있다.

4.2.3.3 사고선로의 구분

열병합발전 시스템의 단자전압 및 전류는 연계선로 사고 시 전류는 증가하며 이러한 사고전류에 의한 전압강하 때문에 단자전압은 감소하게 된다. 리크로저에 의해 선로가 차단 되면 열병합발전 시스템은 단독운전을 하게 되고 단자전압과 전류는 감소하게 됨을 그림 7과 그림 8을 통해 알 수 있다. 하지만 인근선로 사고 시 전압·전류를 살펴보면 먼저 사고 시 사고전류 및 단자전압은 연계선로 사고 시와 비교해 볼 때 그 크기는 다르지만 전류의 증가와 단자전압이 감소하는 경향은 같다. 그러나 리크로저에 의해 사고선로가 차단되었을 때 열병합발전 시스템 측에서는 사고가 제거되었으므로 전압은 회복되고 전류는 다시 부하전류를 회복함을 그림 9와 그림 10을 통해 확인할 수 있다. 이러한 전압·전류의 특성을 비교 분석해 볼 때 인근선로 사고는 리크로저에 의해 사고제거 후 전압이 회복되고 전류가 기존 부하전류를 회복함을 통해 구분할 수 있으며 리크로저에 의해 첫 번째 선로 차단 후 전류의 부하전류 회복시간을 고려하여 최소 3[Cycle]에서 최대 10 [Cycle]내에서 사고선로를 구분한다.

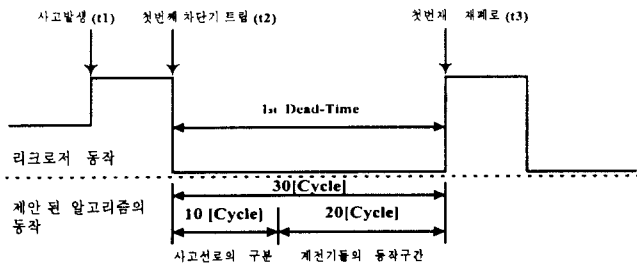


그림 11 재폐로 동작에 따른 사고위치 구분
Fig. 11 Distinction of fault location on reclosing operation

이러한 사고위치 구분 알고리즘을 통해 인근선로 사고 시 계전기에 의한 차단기 트립을 저지하고 연계선로 사고시 계전기에 의한 차단기 트립 신호를 지속시키는 기능이 열병합발전 시스템 설치 수용가 측 보호시스템에 추가되어야 한다.

그림 12는 이러한 보호시스템 알고리즘의 흐름을 보여 준다.

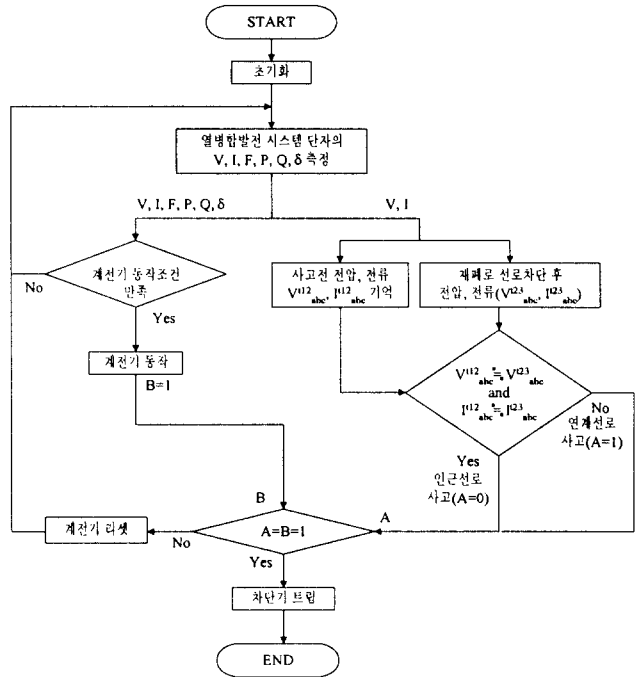


그림 12 열병합발전 시스템의 배전계통 연계를 위해 제안된 보호시스템 알고리즘

Fig. 12 Proposed protection system algorithm for inter-connection with power distribution system of cogeneration system

여기에서, V : 열병합발전 시스템의 단자전압, I : 열병합발전 시스템 측 단자전류, F : 주파수, P : 유효전력, Q : 무효전력, δ : 열병합발전 시스템 측 단자와 배전계통 사이의 위상차, abc : 전원의 각상, t12 : t1~t2 기간, t23 : t2~t3 기간이다.

5. 사례연구

열병합발전 시스템이 연계된 선로에서 리크로저 보호구간과 구분개폐기 보호구간의 사고와 인근선로에서의 사고 시 제안된 보호협조 방식의 동작상태를 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용한 모의 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

시뮬레이션 결과를 나타내는 그림 13-15에서 전압 및 전류 파형은 그림 2의 열병합발전 시스템 단자인 E점에서 측정된 상전압의 순시치를 나타내며 리크로저 및 계전기에 의한 차단기 동작은 각각 Low일 때 선로의 연계를, High일 때 선로의 차단을 나타낸다.

5.1 연계선로의 리크로저(R_1) 보호구간에서의 사고시

연계선로의 리크로저 보호구간에서의 사고를 가정하였을 때 사고는 2가지 경우, 즉 R_1 과 R_2 의 보호구간에서의 사고를 고려할 수 있다. 하지만 R_1 보호구간 사고 시는 그림 2의 A, B, C 중에 어느 위치에 연계되더라도 R_1 의 동작에 따른 열병합발전 시스템 측의 전압, 전류는 크기만 다를 뿐 같은 형태

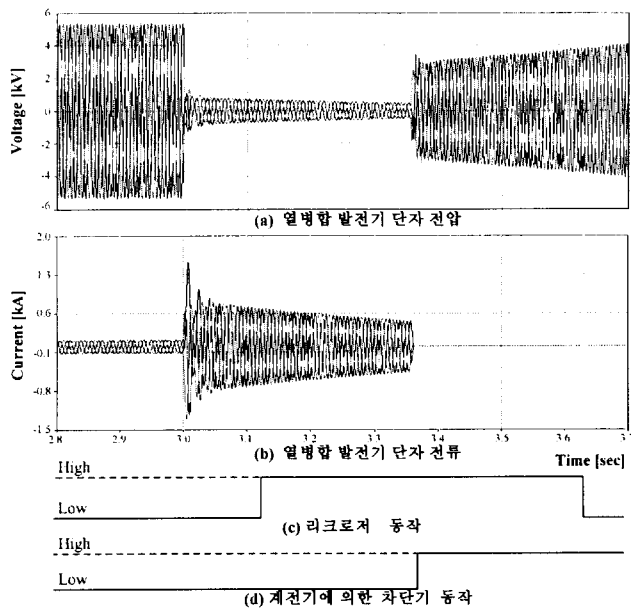


그림 13 연계선로 사고시 리크로저와의 협조
 Fig. 13 Protective coordination recloser on fault in interconnecting distribution line

의 사고특성을 갖게된다. 또한 R_2 보호구간 사고 시에는 열병합발전 시스템이 R_2 의 전단인 A에 연계되었을 때 R_2 의 동작에 의해 사고가 제거되므로 연계운전을 지속하게 되므로 아무런 문제가 없으며 B나 C에 연계되었을 때는 R_1 보호구간 사고 시와 같은 경우가 된다. 따라서 연계선로의 리크로저 보호구간에서의 사고 시에는 문제가 발생할 수 있는 경우, 즉 R_1 보호구간 사고 시 A, B, C점과 R_2 보호구간 사고 시 B, C점에 연계되었을 경우를 고려해야 한다. 그러나 이러한 경우들은 앞에서 설명하였듯이 사고 시 전압, 전류의 크기만 다를 뿐 열병합발전 시스템 측에서 볼 때 같은 형태의 사고로 간주 할 수 있다. 시뮬레이션 조건은 열병합발전 시스템의 연계위치 및 사고위치는 그림 2의 A점으로 가정하고 시뮬레이션 시작 후 3[sec]에 3상 단락사고가 영구사고로 발생한 것으로 모의하였다.

사례연구를 위한 시뮬레이션 결과를 보면 3[sec]에 사고가 발생한 이후 리크로저(R_1)에 의해 선로가 차단되고 계전기에 의해 차단기가 열병합발전 시스템을 배전계통으로부터 분리함에 따라 열병합발전 시스템으로부터 배전계통으로의 유출되는 전류가 제거되었음을 확인할 수 있다.

5.2 연계선로의 구분개폐기(S_1) 보호구간에서의 사고시

연계선로의 구분개폐기(S_1) 보호구간에서의 사고를 가정하였을 때 연계위치는 R_1 , R_2 보호구간인 그림 2의 A, B와 S_1 보호구간인 C점으로 나눌 수 있다. 그러나 연계위치가 R_1 보호구간인 A점일 경우는 S_1 보호구간에서의 사고 시 R_2 에 의해 사고가 제거되므로 연계운전을 지속하게 되어 문제가 되지 않는다. 또한 B, C점에 연계되었을 경우는 다른 사고위치에 의한 사고전류 및 전압의 크기만 다를 뿐 열병합발전 시스템과 S_1 의 동작에 미치는 사고특성은 같은 형태를 띄게 된

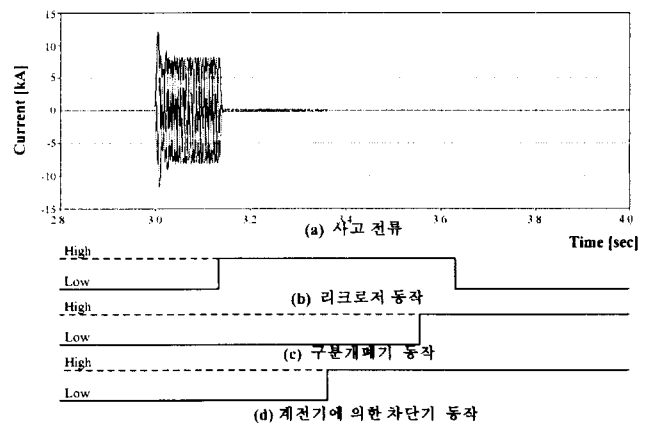


그림 14 연계선로 사고시 구분개폐기와의 협조
 Fig. 14 Protective coordination sectionalizer on fault in interconnecting distribution line

다. 따라서 하나의 경우, 즉 열병합발전 시스템의 연계위치 및 사고위치는 각각 그림 2의 B점과 C점으로 가정하고 시뮬레이션 시작 후 3[sec]에 3상 단락사고가 영구사고로 발생한 것으로 모의하였다.

위의 사례연구를 위한 시뮬레이션 결과를 보면 3[sec]에 사고가 발생한 이후 리크로저(R_2)에 의해 선로가 차단되고 계전기에 의해 차단기가 열병합발전 시스템을 배전계통으로부터 분리시킨 후에 구분개폐기(S_1)가 선로의 무전압을 감지하고 리크로저(R_2)의 동작을 카운트하여 선로를 차단함으로써 사고를 제거함을 확인할 수 있다.

5.3 인근선로의 리크로저(R_0) 보호구간에서의 사고시

인근선로의 리크로저(R_0) 보호구간에서의 사고를 가정하였을 때 연계위치는 R_1 , R_2 보호구간인 그림 2의 A, B와 S_1 보호구간인 C점으로 나눌 수 있다. 그러나 인근선로의 리크로저 보호영역에서 사고 발생 시 R_0 의 동작에 따른 각각의 연계위치에서의 사고전류 및 전압은 크기만 다를 뿐 같은 형태의 사고특성을 갖는다. 따라서 하나의 경우, 즉 열병합발전 시스템의 연계위치 및 사고위치는 각각 그림 2의 A점과 D점으로 가정하고 시뮬레이션 시작 후 3[sec]에 3상 단락사고가 영구사고로 발생한 것으로 모의하였다.

위의 사례연구를 위한 시뮬레이션 결과를 보면 3[sec]에 사고가 인근선로에서 발생함에 따라 리크로저(R_0)에 의해 선로가 차단된 후 열병합발전 시스템의 단자전압 및 단자전류의 회복특성을 통해 인근선로에서의 사고임을 감지하였으므로 계전기가 사고를 감지하더라도 열병합발전 시스템을 배전계통으로부터 분리하지 않고 계속 연계운전을 지속하고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 열에너지와 전기에너지를 함께 이용함으로써 종합에너지 이용 효율을 높일 수 있다는 관점에서 많은 매력을 갖고 있는 열병합발전 시스템의 배전계통 연계운전을

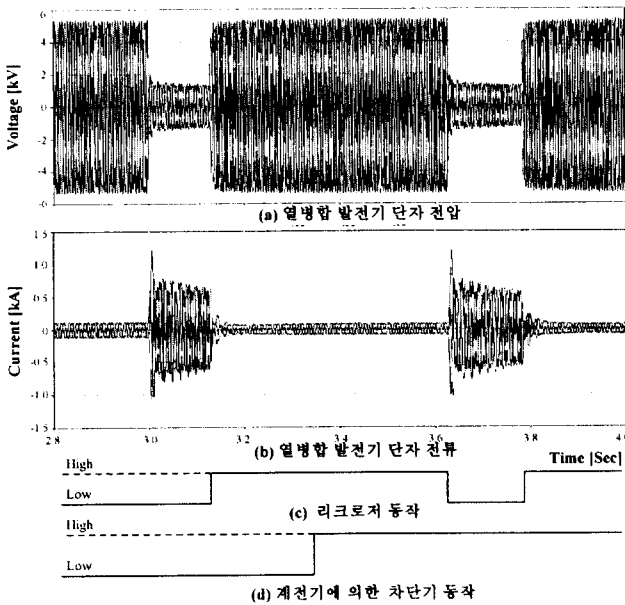


그림 15 인근선로 사고시 보호협조
 Fig. 15 Protective coordination on fault in neighborhood distribution line

위한 보호시스템과 배전계통에 연계된 열병합발전 시스템이 사고 시 사고전류에 미치는 영향을 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 통해 분석해 보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 열병합발전 시스템의 배전계통 연계에 따른 사고전류의 증가는 보호시스템을 구성하는 보호기의 정격 및 보호협조를 위한 각 계전기들의 정정치를 결정하는데 있어서 반드시 고려되어야 한다.
- 2) 리크로저 및 구분개폐기와와의 보호 협조방안에 있어서는, 리크로저의 동작에 의한 단독운전 및 비동기투입과 같은 상황을 막고 리크로저에 의해 선로 차단이후 구분개폐기가 열병합발전 시스템에 의한 사고전류에 의해 오동작을 하지 않기 위해서는 리크로저가 선로를 차단 후 1회 재폐로 하기 전에 보호계전기들에 의해 열병합발전 시스템이 배전계통으로부터 분리하도록 보호협조가 이루어져야 한다.
- 3) 리크로저와의 보호 협조방안에 있어서는, 인근선로 사고 시 배전계통으로부터 열병합발전 시스템의 불필요한 분리를 막기 위해 사고 발생 시 리크로저의 동작에 따른 열병합발전 시스템의 단자전압 및 전류 특성을 분석하여 연계선로와 인근선로의 사고를 판별하고 이를 토대로 기존 보호시스템과 열병합발전 시스템 설치 수용가 측 보호시스템의 협조를 구축하는 방법을 제시하였다. 즉, 기존의 보호협조 방안은 열병합발전 시스템이 연계된 인근선로의 일시사고와 영구사고를 구분할 수 없으나, 제안된 보호협조방안은 열병합발전 시스템 연계선로 및 인근선로 사고 시 각각의 전압, 전류 특성을 분석을 통하여 사고 선로를 판별하고 이를 토대로 계통 연계운전 지속 여부를 결정한다. 제안된 보호 협조방안은 사례연구를 통하여 적합성을 검증하였다.

본 논문에서 제안된 보호협조 방안을 통하여 배전계통에 연계된 열병합발전 시스템은 보다 신뢰성 있고 안전한 운전을 할 수 있으리라 사료된다. 아울러 제안된 보호협조 방안은 열병합발전 시스템의 보호시스템 구성 시 전력계통 회사 및 열병합발전 사업자에게 유용한 자료가 될 것을 믿는다.

감사의 글

본 연구는 에너지자원 기술개발지원센터의 에너지 학술진흥사업의 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] H. Kirkham, R. Das, "Effect of voltage control in utility interactive dispersed storage and generation systems," IEEE Trans. PAS, vol. PAS-103, No.8, pp 2277-2282, August 1984.
- [2] 최준호, 김재철, "분산형 전원이 연계된 배전계통의 주변압기의 새로운 전압조정에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 제47권 12호, pp 2094-2100, 1998년 12월.
- [3] R.C. Dugan, D.T. Rizey, "Electric distribution protection problems associated with the interconnection of small, dispersed generation Devices," IEEE Trans. PAS, vol. PAS-103, No. 6, pp 1121-1127, June 1984.
- [4] R.M. Rifaat, "Critical considerations for utility/cogeneration inter-tie protection scheme configuration," IEEE Trans. IA, vol. IA-31, No. 5, pp 973-977, september/october 1995.
- [5] Summary Report of an IEEE Working Group Report, "Intertie protection of consumer-owned sources of generation, 3MVA or less," IEEE Trans. PWRD, vol. 5, No. 2, pp 924-929, april 1990.
- [6] 日本電氣技術基準調査委員會, 分散型電源系統連系技術指針, JEAG 9701, 1993.
- [7] 김일동 외, "신에너지 분산전원의 계통연계 보호 및 협조에 관한 연구," 전력계통 보호기술 연구회 논문집, 제3권 1호, pp 133-143, 1999년 11월.
- [8] 한국전력공사 배전처, 배전보호기술서, 1995.
- [9] Manitoba HVDC Research Centre, PSCAD/EMTDC power system simulation software manual, 1994.

저 자 소 개



최준호 (崔峻豪)

1970년 7월 30일생. 1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주요 관심분야는 소형열병합발전 및 분산형 전원 계통연계 문제 해석, 초고압 직류송전, 차세대 배전 자동화, 인공지능 전력계통 적용분야 등

Tel : 02-817-7966, 017-243-0072

E-mail : joono@ee.ssu.ac.kr



추동욱 (秋東旭)

1960년 1월 29일생. 1983년 충남대 전기공학과 졸업. 1991년 숭실대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 박사과정 수료. 1998년~현재 경문대 공대 전기공학과 교수. 주요 관심분야는 전지전

력저장시스템, 전지 모델링 및 특성 해석, 배전계통 부하관리 및 예측 등

Tel : 0333-656-3289

E-mail : choodw@kmc.ac.kr



정성교 (鄭聖敎)

1973년 9월 10일생. 1998년 숭실대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 기인시스템(주) 연구원. 주요 관심분야는 디지털 계전기 개발 및 실험, PSCAD/RTDS를 이용한 전력

계통 모델링 및 계전기 실험 등

Tel : 02-521-0980(257)

E-mail: skjung@keyinsystem.com



김낙경 (金洛京)

1953년 6월 24일생. 1984년 인천대 전기공학과 졸업. 1994년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 주식회사 대동 기술단 대표이사. 주 관심분야는 전력설비 설계, 배

전계통 부하관리 및 예측 등

Tel : 02-332-3329

E-mail : nkkim@dd-eng.com



김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~현재 숭실대 공대 전기공학과 교수. 주요 관심분야는 전력설

비 진단 및 전문가 시스템, 전력 품질 및 신뢰도, 배전계통 최적화, 소형 열병합발전 및 분산형 전원 계통연계 문제 해석 등

Tel : 02-820-0647, 011-311-2318

E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr



손학식 (孫學植)

1955년 5월 5일생. 1983년 숭실대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1985년 발송배전기술사. 1995년 건축설비 기술사. 1998년 소방설비

기술사. 1980년 동력자원부 산하 에너지관리공단 입사. 1999년~현재 산업자원부 산하 에너지관리공단 효율기술처장. 주요 관심분야는 전력 에너지 효율 이용, 전력 에너지 수요 관리 등

Tel : 011-213-2999

E-mail : hsson@kemco.co.kr