

# 정전복구에 대한 배전계통 상정사고 해석법

## Contingency Analysis about Restoration of outage in Distribution System

박 정 은\* · 김 형 승\* · 최 면 송\* · 이 승 재\* · 임 성 일\*\* · 현 승 호\*\*\*

(Jeong-Eun Park · Hyung-Seung Kim · Myeon-Song Choi · Seung-Jae Lee · Seong-Il Lim · Seung-Ho Hyun )

**Abstract** - This paper identifies the issues of contingency analysis for restoration in distribution systems. Contingency analysis has been applied to transmission systems but not to distribution systems. The distribution system is different from transmission system. So it is hard to apply for existing contingency analysis to distribution system. In this paper, a new contingency analysis method for distribution systems is proposed. The proposed method is based on service restoration capability. It aims to minimize outage left after service restoration in case of a fault in advance. The method estimates the vulnerability which is represented by zone restoration index proposed in [1]. Applying the proposed method, operators could change the system so that it does not leave any outage left after restoration. Case study has been carried out on a five feeder system and its results show effectiveness of the method.

**Key Words** : Distribution automation system, Contingency analysis, Restoration, Zone restoration index

### 1. 서 론

전력계통의 상정사고 해석이란 계통에 발생 가능한 사고를 가정하여 이들 사고가 발생하였을 경우 계통의 운전 상태를 예측하기 위함이다. 상정사고 해석을 통해 계통 운영자는 계통의 이상 유무를 확인할 수 있으며 이를 해소하고 다른 2차 사고를 초래하지 않도록 대책을 수립하여 안정적으로 계통을 운영할 수 있다. 또한 계통의 계획측면에서 신규 설비가 투입되기 전에 투입에 따른 계통 변화 특성을 분석하여 대책을 수립할 수 있다 [2],[3].

현재 경제 성장에 따라 지속적으로 전력소비량이 증가하고 있지만 이를 부담할 수 있는 전력설비의 확충이 지연되어 전력설비에 과부하가 생겨 고장이 발생할 수 있다. 또한 발전기 결함으로 인한 불시정지 또는 송전선로의 결함, 낙뢰, 산불, 기타 자연재해 등으로 인해 고장이 발생 할 수 있다. 위와 같이 고장 발생 시 장시간 동안의 공급지장, 과부하 또는 모선에 이상 전압 등이 발생하지 않도록 하여야한다. 이를 해결하는 적절한 대책을 수립하여 안정적인 운영을 하기위해 송전계통에서는 상정사고 해석을 통해 계통의 위험성을 지수로 평가한다[4],[6],[7],[8]. 이는 사고의 파급을 막기 위한 예방제어 및 계통 계획 시 중요한 지표가

되며, 향후 시각적으로 수치정보를 제공하여 비상상황 시 운영자가 신속하고 객관적으로 계통상황을 판단하여 대응할 수 있도록 기술 개발이 이루어지고 있다[2].

배전계통은 방사상 구조로 운영되어 고장 발생 시 정전을 수반하며 수용가와 직접 연결되어 있어 계통에 고장 발생 시 직접적인 피해를 입을 수 있다. 따라서 배전선로에 산재되어 있는 배전자동화용 단말장치(FRTU : Feeder Remote Terminal Unit)을 원격으로 감시, 제어하여 계통에 고장이 발생하였을 때 정전시간을 단축하고 정전구간을 축소하여 전력 공급 신뢰도를 높이기 위해 배전자동화 시스템 (DAS: Distribution Automation System)이 도입되었다. 배전자동화시스템의 도입으로 인해 고장으로 인한 정전발생 시 신속하게 연계폐터로 정전 부하를 절체 하여 전력공급을 재개할 수 있다[5]. 하지만 배전계통에서 운영 또는 계통 구성 상황으로 인해 복구가 안되는 구간이 발생할 가능성을 배제할 수 없다. 그러므로 정전복구를 신속하게 수행하기 위해서 먼저 사고를 상정하고 계통상황을 인지하여 복구가 될 수 없는 부분이 있는지 미리 확인하는 상정사고해석이 필요하다. 하지만 이미 제안된 상정사고 해석법은 송전계통에 한하며 배전계통과 송전계통의 구조 및 운영방안이 달라 배전계통에 송전계통 상정사고 해석법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 복구가 가능하지 않는 구간을 미리 알아 보기위해 배전계통에 송전계통 상정사고 개념을 도입하고 참고문헌[1]에 제시된 복구지수를 활용하여 정전구간의 복구가능성을 평가하는 상정사고 해석법을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2.1장에서는 기존 계통의 상정사고 해석법을 고찰한다. 2.2장에서는 상정사고 해석 시 고려해야할 배전계통 구조 및 운영의 특성, 2.3장은 배전계통 상정사고

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea  
E-mail: je1351@naver.com

\* Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea  
\*\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea  
\*\*\*Dept. of Electrical Engineering, Ulsan University, Korea  
Received : December 11, 2015; Accepted : July 25, 2016

해석의 개념 및 필요성을 설명하며 2.4장에서 해석방법을 제안한다. 2.5장에서는 제안한 상정사고 해석법을 통한 계통 평가 및 그에 따른 조치방법을 설명한다. 3장에서는 사례연구를 통해 제안된 배전계통 상정사고 해석방법이 배전계통 운영에 적합여부를 시뮬레이션으로 보인다.

## 2. 상정사고 해석 개념 및 제안하는 해석방법

상정사고 해석이란 전력계통에 발생 할 수 있는 고장을 상정 하였을 때 계통의 운영 상태를 예측하여 계통의 과부하 상태 또는 전압불안정 등이 발생하는지를 미리 알아보는 것이다. 배전계통은 구조 및 운영으로 인해 고장 발생 시 선로 전체가 정전을 경험하며 이로 인해 기존의 상정사고 해석법을 적용하기 위해서는 고려해야할 사항이 많다. 따라서 배전계통에 적합한 상정사고 해석방법이 필요하다.

### 2.1 기존 계통 상정사고 해석 고찰

이미 발표된 상정사고 해석법은 주로 송전계통에 한하여 제시되었다. 우리나라 송전계통은 망상구조로 다른 회선과 연계되어 운영되며 일반적으로 송전선로는 2회선 이상을 병렬로 구성하여 전력을 공급한다. 그림 1은 상정사고해석의 필요성을 설명하기 위한 예제 계통으로 다른 회선과 연계된 축약된 송전계통을 나타내며 각 발전기의 발전량과 공급하는 부하량을 그림에서 보인다. 회선1이 그림 1과 같이 고장으로 인하여 차단될 경우 다른 건전 회선 2는 고장회선의 부하를 부담하여 발전량을 증가시켜 정전 없이 급전을 계속 할 수 있다. 그러나 단시간에 발전할 수 있는 용량은 제한적이기 때문에 추가 고장이 발생할 수 있다. 또한 회선2가 부하 증가로 인하여 송전선의 정격용량을 초과할 경우 과부하가 유발되어 계통에 고장이 연쇄적으로 파급되는 광역정전이 초래될 수 있다. 하지만 회선1에 고장 발생 시 회선2에 초래할 위험성을 미리 알 수 있다면 G2가 단시간의 발전할 수 있는 발전량을 증가시키거나 G3의 발전량을 증가시켜 부하를 부담하여

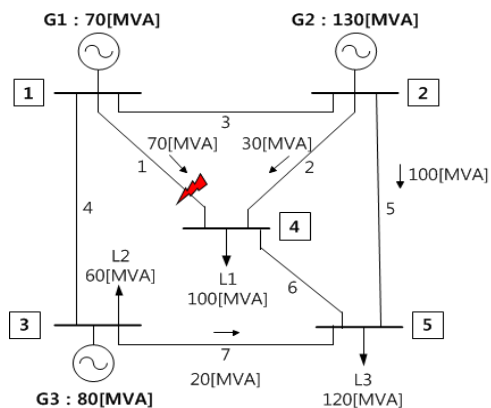


그림 1 선로에 고장발생 시 송전계통  
Fig. 1 The transmission system with a line fault

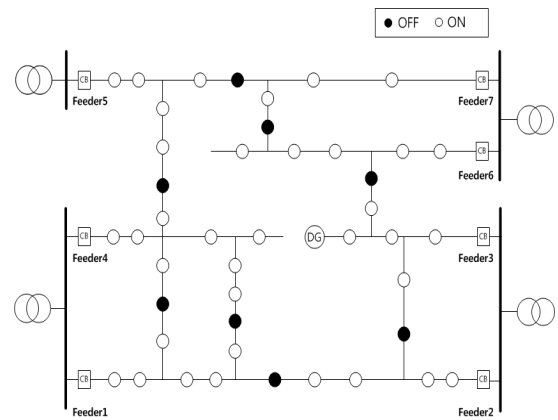


그림 2 배전계통의 방사상 구조  
Fig. 2 Radial structure of distribution system

이를 해결할 수 있다. 따라서 실제 고장이 발생하였을 때 고장이 확대 되지 않도록 사전에 대책을 취하기 위해 상정사고 해석이 필요하다.

송전계통에서는 선로에 고장을 상정하여 고장에 의해 다른 건전 회선의 조류가 계통 허용범위 위반여부 또는 계통의 과부하 여부를 지수화하여 계통의 위험정도를 나타낸다. 이를 통해 고장이 발생하기 전 과부하 및 이상상황이 발생할 수 있는 회선을 사전에 파악할 수 있다. 더 나아가 고장이 다른 건전한 부분으로 파급되어 확대되지 않도록 발전량 조절, 부하절제 등의 운영방안을 모색할 수 있으며, 운영방안을 사전에 제시하여 운영자가 빠른 후속 조치를 취할 수 있도록 한다[4],[14],[15],[16],[17].

### 2.2 상정사고 해석 시 고려해야할 배전계통 구조 및 운영의 특성

방사상구조는 설치비용이 적게 들어 경제적이며 수요가 증가할 때마다 간선이나 분기선을 연장 또는 증강하여 신규 부하 증설에 용이하여 국내 배전계통은 방사상구조, 루프구조 등으로 구성된다. 배전계통은 일반적으로 루프 구조이지만 그림 2와 같이 부하를 적절히 분배하여 연결점을 상시 개방하는 방사상구조로 운영된다.

배전계통은 방사상 운영을 하기 때문에 선로에 고장 발생 시 고장구간 뿐만 아니라 선로 전체가 정전이 된다. 따라서 정전구간과 정전시간을 최소화하기 위해 건전한 정전구간의 정전복구가 중요하다. 그림 3은 배전계통의 정전복구과정을 설명한다. 만약 구간 ①에 고장이 발생하면 전원측 차단기가 동작하여 피더1이 부담하는 선로 전체가 정전이 된다. 운영자는 고장 구간과 복구할 수 있는 정전구간을 판단하여 고장구간(①)을 계통으로부터 분리한 후 피더1이 전원측(③) 정전구간에 전력공급을 재개하도록 한다. 고장구간 이후의 부하측(②) 정전구간은 연계피더에 의해 정전복구를 할 수 있다. 이때, 연계피더의 공급여용량보다 큰 정전부하를 연계피더로 절체한다면 연계된 모든 선로가 과부하가 되고 정전구역이 더 확대되어 고장파급효과가 더욱 커질 가능성이 있다. 따라서 운영자는 그림 3과 같이 부하측(②) 정전구

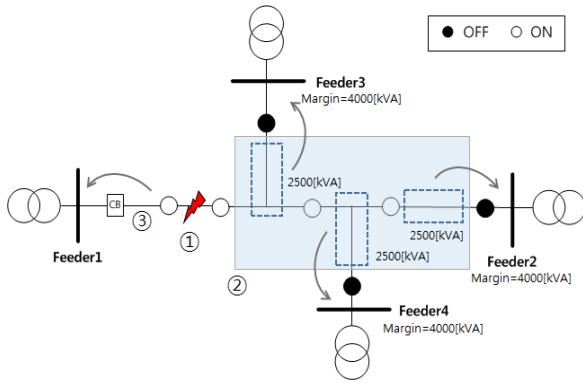


그림 3 배전계통에서 고장 발생 시 복구과정  
 Fig. 3 Restoration progress when fault occurs in distribution system

간을 연계피더로 절체 할 때 연계피더가 과부하가 되지 않도록 적정하게 분할하여 정전구간을 복구한다[9],[10],[11],[12].

### 2.3 배전계통 상정사고 해석의 개념 및 필요성

배전자동화시스템의 도입으로 고장발생에 의한 정전발생 시 연계피더로 정전 부하를 절체 하여 신속하게 정전복구를 할 수 있다. 하지만 계통 운영 또는 계통 구성 상황에 따라 복구가 취약한 구간이 발생할 가능성이 있어 사전에 계통검토가 필요하다.

국내의 배전선로 운전용량 운영기준은 전선이 ACSR160 [mm<sup>2</sup>]일 때 평상시 10,000[kVA] 이내, 비상시 운전용량은 최대 14,000 [kVA]로 규정하고 있다. 그림 4에서 피더 2, 3, 4는 10,000 [kVA]의 부하를 부담하며 비상시 최대운전용량이 14,000 [kVA]일 때 피더 2, 3, 4는 각 4,000[kVA]의 공급여유용량을 확보하여 구간 ①에 고장이 발생하였을 때 복구가 가능하도록 설계되었다. 하지만 만약 피더2와 연계된 다른 선로에서 고장이 발생하여 피더2가 2,000[kVA]의 정전부하를 절체 받아 공급여유용량이 2,000[kVA]인 상태로 계통을 운영하는 상황에서 구간 ①에 고장이 발생한다면 구간 ②의 부하가 피더2의 공급여유용량보다 크기 때문에 피더2의 공급여유용량이 부족하여 구간 ②는 복구

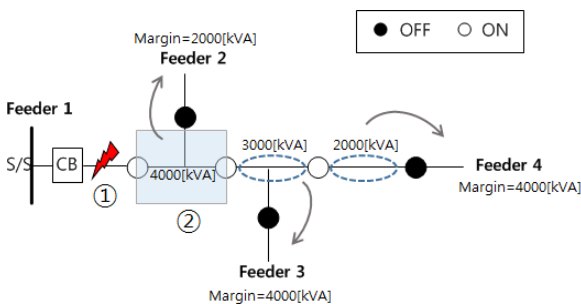


그림 4 고장발생시 운영상 복구가 취약한 경우  
 Fig. 4 A case of operational problem in the restoration when fault occurs

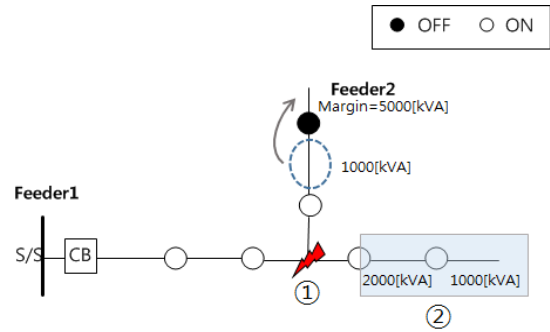


그림 5 고장발생시 구조상 복구가 취약한 경우  
 Fig. 5 A case of structural problem in the restoration when fault occurs

가 될 수 없다. 모든 선로는 자기선로 부하에 전력을 공급하며 연계선로에 고장이 발생하였을 때 정전구간 부하를 절체 받아 복구를 해야 하기 때문에 일정량의 공급여유용량을 확보하며 운영해야 한다. 따라서 구간 ②는 계통 운영상 복구가 안되는 것을 판단할 수 있다.

그림 5와 같이 구간 ①에 고장이 발생할 경우 고장 구간의 전원 측 정전구간은 전원에 의해 정전 복구된다. 하지만 구간 ②는 부하를 절체 받을 연계피더가 없기 때문에 복구가 될 수 없는 구간이며 이는 계통 구성 상황으로 복구가 취약한 것을 판단할 수 있다.

위와 같이 계통 운영 또는 계통 구성 상황에 따라서 복구가 안되는 부분이 발생할 가능성이 있다. 이러한 이유로 운영자가 신속하게 정전구간을 복구를 하기 위해서는 복구가 취약한 구간을 파악하여 계통상황을 미리 검토 할 수 있는 상정사고 해석이 필요하다. 그러나 이미 제안된 상정사고 해석법은 송전계통에 한하여 제안되어 왔다. 송전계통은 2.1장의 설명과 같이 고장 발생 시 우회선로의 정전을 유발시킬 수 있는 위험성이 있다. 하지만 배전계통은 송전계통과 구성 및 운영방안이 달라 고장 발생 시 우회선로의 정전을 유발하지 않지만, 고장선로 전체가 정전이 된다. 따라서 배전계통에 송전계통 상정사고 해석법을 그대로 적용할 수 없다. 그러므로 배전계통에 고장 발생 시 정전 복구가 되지 않는 위험성을 알아보기 위한 배전계통 상정사고 해석이 필요하다.

본 논문에서는 앞서 언급된 송전계통 상정사고 해석의 개념을 배전계통에 적합하도록 도입하여, 연계피더가 건전한 정전구간을 복구하고자 할 때 과부하 여부를 지수화하여 미리 파악하고, 이를 활용하여 선로 어느 구간에 고장이 발생하더라도 정전구간의 복구가 되지 않는 위험성을 판별할 수 있는 배전계통 상정사고 해석법을 제안한다.

### 2.4 제안하는 배전계통 상정사고 해석방법

배전계통 상정사고 해석법은 임의의 구간에 고장을 상정하여 연계선로가 고장구간을 제외한 부하측 정전구간의 부하를 절체 받았을 때 과부하여부를 알아보기 위함이다. 참고문헌[1]의 구간

복구지수를 활용하고 복구가 안되는 구간을 인지하여 위험성을 지수로 나타내는 것으로 모든 구간에 고장을 상정하여 알아보았을 때 복구가 취약한 구간을 미리 검토 할 수 있다. 참고문헌[1]의 복구지수는 연계피더가 정전구간을 복구할 수 있는지를 나타내며 해당구간의 복구가능성을 판별하는 역할을 한다. 본 논문에서는 간선 및 분기선의 증가로 계통의 연계가 복잡하게 변화된 것을 감안하여 한 선로가 동일선로에 2연계이상 연계된 경우와 분산전원이 연계된 경우를 고려하여 복구가능성을 해석한 구간복구지수를 추가로 제안하였다. 구간복구지수를 구하는 방법은 다음과 같다[13].

2.4.1 고장 시 정전복구 위험성 판별방법

상정사고 해석 시  $FM_E$ 는 배전선로 적정 운전용량의 비상시 최대 운전용량이며,  $FTL_j$ ( $FTL$  : Feeder Total Load)는 피더  $F_j$ 가 부담하는 자기선로 부하의 총 부하 합이다. 따라서 피더의 공급여유용량은 자기선로 부하에 전력을 공급하고 남은 여유용량을 나타낸다. 피더의 공급여유용량은 다음 식(1)로 표현된다.

$$FM_j = FM_E - FTL_j \tag{1}$$

- 단,  $FM_j$  : 피더  $F_j$ 의 공급 여유용량
- $FM_E$  : 비상시 배전계통 최대 운전용량
- $FTL_j$  : 피더  $F_j$ 가 부담하는 자기선로의 총 부하 합

선로 중 임의의 구간에 고장을 상정하였을 때 이 선로의 연계 피더를 찾아 각 연계피더의 공급여유용량을 확인한다. 그 다음으로 해당선로와 연계피더의 상시개방점을 기준으로 각 연계피더  $F_j$ 에서 고장을 상정한 구간의 전 구간까지 후비연계용량( $ZSC$  : Zone Supporting Capacity)을 구한다[1]. 후비연계용량이란 피더  $F_j$ 가 구간  $Z_i$ 에 대하여 얼마나 많은 공급여유용량을 제공하는지를 의미하며 정상 시 후비연계용량은 수식 (2)에 보인다. 말단구간은 연계피더가 없는 구간으로 말단구간과 연계된 구간에서 피더의 공급 여유용량에 따라 복구가능성 여부가 결정되며 식 (3)의 조건을 만족 시 이를 따르며, 만족하지 않을 시 식 (2)를 따른다.

$$\text{정상시 : } ZSC_{i,j} = FM_j - DPL_{i,j} \tag{2}$$

$$\text{말단구간이 연계 시 : 조건 } FM_j > DPL_{i,j} + TPL_{k,i} \text{ 만족 시}$$

$$ZSC_{i,j} = FM_j - DPL_{i,j} - TPL_{k,i} \tag{3}$$

- 단,  $ZSC_{i,j}$  : 피더  $F_j$ 의 구간  $Z_i$  후비연계용량
- $FM_j$  : 피더  $F_j$ 의 공급 여유용량
- $DPL_{i,j}$  : 구간  $Z_i$ 에서 피더  $F_j$ 의 상시개방점까지 직선 경로 부하 합
- $TPL_{k,i}$  : 구간  $Z_i$ 에 연결된 말단구간의 부하 합
- 연계피더의 공급여유용량에서 연계피더의 상시개방점에서 임

의의 구간까지 직선경로 부하를 뺀 값을 그 구간의 후비연계용량이라 하며 만약 임의의 구간에 공급 가능한 연계피더가 다수라면 그 구간에 해당하는  $ZSC$ 값 중 가장 큰 값을 그 구간의 구간복구지수( $ZRI$  : Zone Restoration Index)라하며 식 (4)과 같이 표현된다[1].

$$ZRI_i = \text{MAX}_j (ZSC_{i,j}) \tag{4}$$

- 단,  $ZSC_{i,j}$  : 피더  $F_j$ 의 구간  $Z_i$  후비연계용량
- $ZRI_i$  : 구간  $Z_i$ 의 구간복구지수

이는 연계피더가 해당구간을 복구하고 남은 공급여유용량을 나타낸다. 구간복구지수( $ZRI$ )가 0 이상이면 최소한 그 구간은 복구가 가능하다는 것을 의미하며, 음수이면 그 구간은 선로의 고장 발생 시 다른 연계피더에 의해 복구가 안 되는 구간을 의미한다.

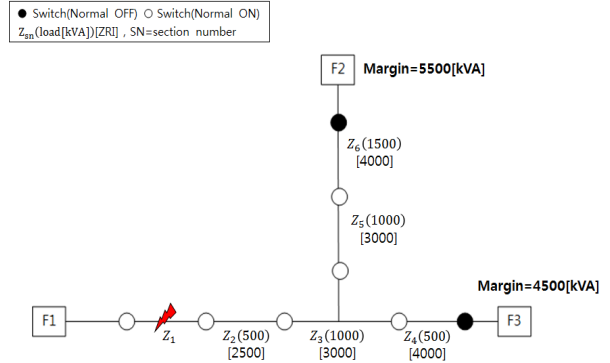


그림 6 제안한 방법을 적용한 예제 계통  
Fig. 6 A case applied to proposed method

다음 그림 6은 제안하는 상정사고 해석을 설명하기 위한 간단한 예제 계통이다. F1, F2, F3은 각 피더를 의미하며 F2, F3의 공급여유용량은  $FM_E$ 가 14,000[kVA],  $FTL_2$ 가 8500[kVA],  $FTL_3$ 가 9500[kVA]일 때 식 (1)에 따른 여유용량이다. 고장 상정 시 식(2)와 (4)를 만족하는 부하 측 정전구간의 복구가능성을 판별할 수 있다.  $Z_1$ 에 고장을 상정하였을 때  $Z_2(500)[2500]$ 는 부하가 500[kVA]를 의미하며, 2500은  $ZRI_2$ 를 의미한다. 식 (2)에 따라 구간  $Z_3$ 은 F2에 의해  $ZSC_{3,2}$ 는 2000, F3에 따른  $ZSC_{3,3}$ 는 3000이므로 식 (4)를 만족하는  $ZSC_{3,3}$ 이  $Z_3$ 의  $ZRI_3$ 이된다. 상정사고 결과  $ZRI$ 가 0보다 작은 경우가 없으므로  $Z_1$ 에 고장 시 부하측 정전 구간은 복구가 가능하다는 것을 미리 알 수 있다.

배전계통에서 한 선로가 동일선로에 2연계이상 연계된 경우가 있을 수 있다. 그림 7은 F2가 F1의 두 지점에서 연계된 경우를 축약하여 나타낸 계통이다. 이러한 경우를 고려하였을 때 연계선로의 여유용량으로 인해 복구가능성을 판별하기 위한 어려움이 있어 순서를 정하여 구간복구지수를 구해야 할 필요성이 있다. 정전복구의 목적은 가능한 많은 부하를 복구하는 것이기 때문에

큰 부하와 연계된 상시개방점을 우선순위로 하며, 식 (5)에 따라 판별한다. 이는  $TDL_{k,j}$ (Total Direct Load)을 구하는 방법으로 수식으로 나타낸 것으로 연계피더  $F_j$ 가 동일선로에 2연계 이상 연계 시 상시개방점의  $Z_k$ 에서부터 고장구간 전단인  $Z_n$ 까지의 구간부하의 합을 나타낸다.

$$TDL_{k,j} = \sum_k^n S_{sn} \tag{5}$$

- 단,  $k$  : 상시개방점 구간
- $sn$  : 고장구간 전단 구간
- $TDL_{k,j}$  : 상시개방점의  $Z_k$ 에서부터 고장구간 전단인  $Z_n$ 까지 부하 합

이때  $TDL_{k,j}$ 가 큰 상시개방점의  $Z_k$ 에서부터 구간복구 지수를 구해나가며 이를 고려하고 남은 여유용량으로 그 다음  $TDL_{k,j}$ 의 상시개방점을 기준으로 구간  $Z_k$ 에서부터 구간복구지수를 구해 나간다. 그림 7은 제안한 방법을 적용한 경우를 나타낸다. F2는 F1에 2연계 되어 있으며  $TDL_{1,2}$ 는 4000[kVA],  $TDL_{3,2}$ 는 1000[kVA]이므로  $TDL_{1,2}$ 이 크므로  $Z_1$ 을 기준으로 ZRI를 구할 수 있으며 이를 통해 복구가 안되는 구간  $Z_3$ 을 확인할 수 있다.

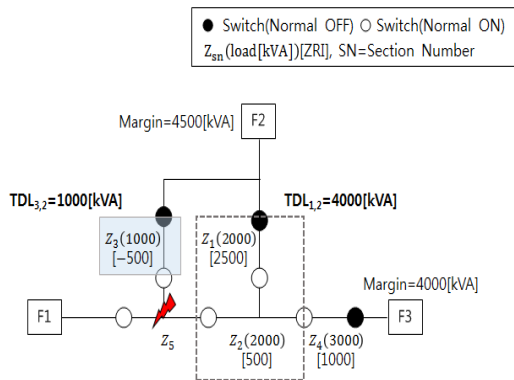


그림 7 제안한 방법을 적용한 동일 선로에 2연계 이상 연계 된 경우

Fig. 7 A case applied to proposed method when a feeder was connected in the same feeder more than twice

### 2.4.2 분산전원 연계 시 추가 고려사항

분산전원이란 기존의 대규모 집중형 전원과는 달리 소규모로 소비지 근방에 분산배치가 가능한 전원을 말하며, 열병합발전, 디젤발전, 태양광, 풍력발전 등이 있다. 현재 배전계통은 스마트그리드 보급으로 분산전원의 계통연계가 점점 더 증가하여 복잡한 공급체계를 구성하고 있으며, 분산전원의 특성에 따라 계통 운영방안이 달라질 수 있다. 배전계통에 연계된 분산전원의 경우 계통으로부터 전력을 공급 받을 수 있으며 잉여전력이 있을 경우 판매할 수 있기 때문에 이를 고려한 구간복구지수가 필요하다. 분산전원은 출력이 일정하면서 조절이 가능한 경우와 출력이 자

연현상에 의존하는 경우로 나눌 수 있다. 분산전원의 출력이 일정한 경우 분산전원이 일부의 부하를 담당하기 때문에 음의 부하로 간주하여 처리할 수 있어 분산전원의 출력만큼 선로의 여유용량을 늘릴 수 있다. 하지만 신재생 에너지를 사용하는 분산전원의 경우 자연현상의 영향을 받기 때문에 출력량을 예측하기 어려워 음의 부하로 간주 시 복구과정에서 과부하를 유발할 위험이 있어 본 논문에서는 고려하지 않는다. 분산전원이 연계된 선로에 고장이 발생한 경우 분산전원은 단독운전 방지 차원에서 발전을 중단하기 때문에 연계피더가 없는 경우로 볼 수 있다. 그러나 고장을 상정한 구간의 연계피더가 분산전원을 포함하는 경우 분산전원이 일부부하를 담당하기 때문에 분산전원의 출력만큼 선로의 여유용량을 늘릴 수 있어 분산전원의 출력용량을 고려하여 피더의 공급여유용량을 산정해야 할 필요성이 있다.

### 2.5 제안한 상정사고 해석법을 통한 계통 평가 및 조치방법

제안하는 배전계통 상정사고 해석법을 통하여 계통 운영 또는 계통구성 상황에 따른 복구가 취약한 구간을 판별할 수 있으며 이에 상응하는 조치방법을 제안할 수 있다.

다음 그림 8은 제안한 배전계통 상정사고 해석법을 설명하기 위한 예제 계통이며 F2 전원 근단에 고장을 상정하였다.  $Z_8$ 와  $Z_{14}$ 은 각각의 피더가 담당하는 선로의 축적된 전체부하이며 배전선로 비상시 최대 운전 용량이 14,000[kVA]이라 할 때 각 연계 피더의 공급여유용량을 구할 수 있다. 구간  $Z_1$ 은 출력이 일정한 분산전원과 연계된 구간이며 고장 발생 시 단독운전방지 차원에서 발전을 중단하여 연계피더가 없는 말단구간으로 본다. 구간복구지수는 그림 9와 나타나며 구간  $Z_8$ 의 ZRI가 음수인 것을 확인할 수 있다. 식 (3)에 따라  $Z_1$ 은 연계구간의 여유용량에 따라 복구가 가능하다는 것을 판별할 수 있다. 하지만  $ZSC_{8,1}$ 은 -300,  $ZSC_{8,3}$ 이 -1000이므로  $ZRI_8$ 은 -300이며 복구가 가능하지 않다는 것을 알 수 있다. 전원 근단에 고장이 발생할 경우 복구해야할 정전부하가 크므로 복구가 안되는 구간이 발생할 수 있어 안정적인 전력공급을 위해 연계피더의 공급여유용량을 충분히 확보하여

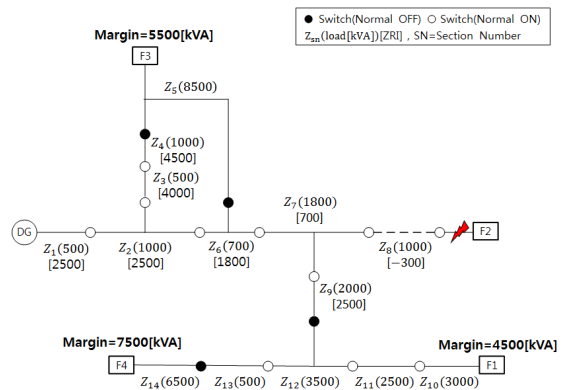


그림 8 상정사고 해석을 적용한 예제계통1

Fig. 8 A example system 1 applied suggested Contingency Analysis

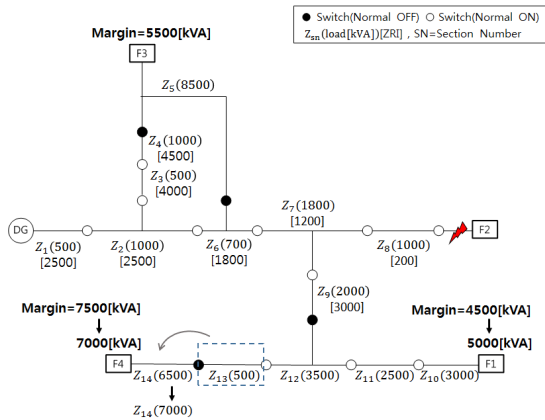


그림 9 상정사고 해석을 통해 복구가 취약한 구간이 개선된 예제 계통1  
 Fig. 9 An improved example system 1 applied suggested Contingency Analysis for restoration

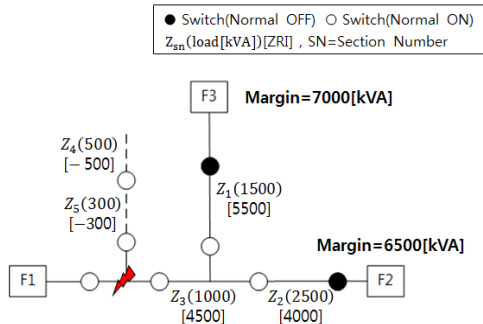


그림 10 상정사고 해석을 적용한 예제 계통2  
 Fig. 10 A example system 2 applied proposed Contingency Analysis

운영해야 한다. 따라서 제안된 배전계통 상정사고 해석법을 통해 계통 운영 상황으로 복구가 취약한 구간을 미리 알 수 있다.

그림 9는 그림 8에서 F2의 전원 근단에 고장 상정 시 구간 Z<sub>1</sub>가 복구가 취약한 것을 확인하여 이를 보완하기 위한 과정을 나타낸다. 연계피더 F1의 건전부하를 F4로 절체하여 F1의 여유용량 증가 시 ZRI<sub>8</sub>이 음수에서 양수로 개선되어 모든 구간이 복구가능하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 상정사고 해석을 통해 계통을 검토할 수 있으며 복구가 취약한 구간을 확인할 수 있다. 또한 이를 개선하기 위해 계통구조를 변경할 경우 상정사고 해석을 통해서 계통이 운영에 맞게 구조변경을 하였는지 확인이 가능하다. 따라서 계통이 정전 복구가 안되는 구간 없이 복구를 할 수 있도록 재배치되었는지 평가하는데 기여할 수 있다.

그림 10에서 다음과 같은 고장이 발생하였을 때 구간 Z<sub>4</sub>, Z<sub>5</sub>는 정전구간이며 ZRI를 통해 구간 Z<sub>4</sub>, Z<sub>5</sub>는 복구가 가능하지 않다는 것을 알 수 있다. 구간 Z<sub>4</sub>, Z<sub>5</sub>를 절체 받을 수 있는 연계피더가 없는 말단구간이며, 이는 계통 구조상 복구가 될 수 없다는 것을 상정사고 해석을 통해서 판단할 수 있다.

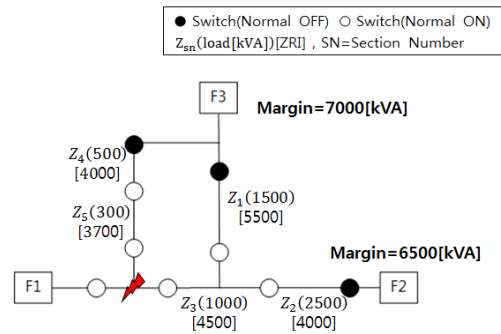


그림 11 상정사고 해석을 통해 복구가 취약한 구간이 개선된 예제 계통2  
 Fig. 11 An improved example system 2 applied proposed Contingency Analysis for restoration

그러므로 그림 11과 같이 구간 Z<sub>4</sub>, Z<sub>5</sub>에 피더를 연계하여 계통 구조를 보완한 후 ZRI가 개선되는 것을 확인 할 수 있었으며 상정사고 해석을 활용하여 복구가 취약한 계통 구조 상황을 파악하는데 기여할 수 있다.

### 3. 사례 연구

본 논문에서는 제안된 배전계통 상정사고 해석의 실효성을 검증하기 위해 5모선 계통을 시뮬레이션 시험을 하였다. 그림 12은 시뮬레이션 계통을 나타내며 각 구간에 고장 상정 시 피더의 여유용량, 구간부하와 상정사고해석을 통해 산출된 구간복구지수(ZRI)를 각 구간에 도식화하여 나타내었다. 각 구간에 고장 상정 시 구간복구지수(ZRI)가 다른 경우가 발생 할 수 있으며 이 또한 위험성을 판별하기 위해 추가로 나타낸다. 결과 데이터는 사례연구 시뮬레이션 진행 시 데이터베이스에 저장되어있는 구간부하에 따라 상정사고해석을 적용하여 자동으로 계산되어 입력되도록 진행하였다. 비상시 배전선로의 최대운전용량 14,000[kVA]를 적용 하였으며 DG107, 108, 109은 출력이 일정한 분산전원으로 FDR1의 공급여유용량은 이를 고려하였다. 상정사고 해석을 통하여 계통을 검토할 수 있으며 시뮬레이션을 해석한 결과는 다음과 같다.

계통 운영 상황에 따른 복구가 취약한 구간: ④

FDR4 선로의 ④번(구간 38과 16, 17, 91)의 ZRI가 음수이므로 복구가 가능하지 않다. 이는 운영상 충분한 여유용량을 확보하지 못한 것으로 판단할 수 있으며 연계피더 FDR1 또는 FDR5의 부하를 다른 피더로 절체 하여 여유용량을 늘린다면 해결할 수 있음을 알 수 있다.

계통 구조 상황에 따른 복구가 취약한 구간: ①, ②, ③, ⑤, ⑥

FDR5 선로에서 ①, ②번(구간 92, 163과 147)은 연계피더가 없는 말단구간이지만 FDR5 선로에 고장 상정 시 연계구간의 여유용량이 충분하므로 복구가 가능하다. 그러나 계통 구조 상 구간 87, 88, 148, 149와159에 고장 발생 시 복구가 될 수 없는 위험성을 가지고 있어 ZRI를 추가로 나타내었으며, 이는 ①, ②번

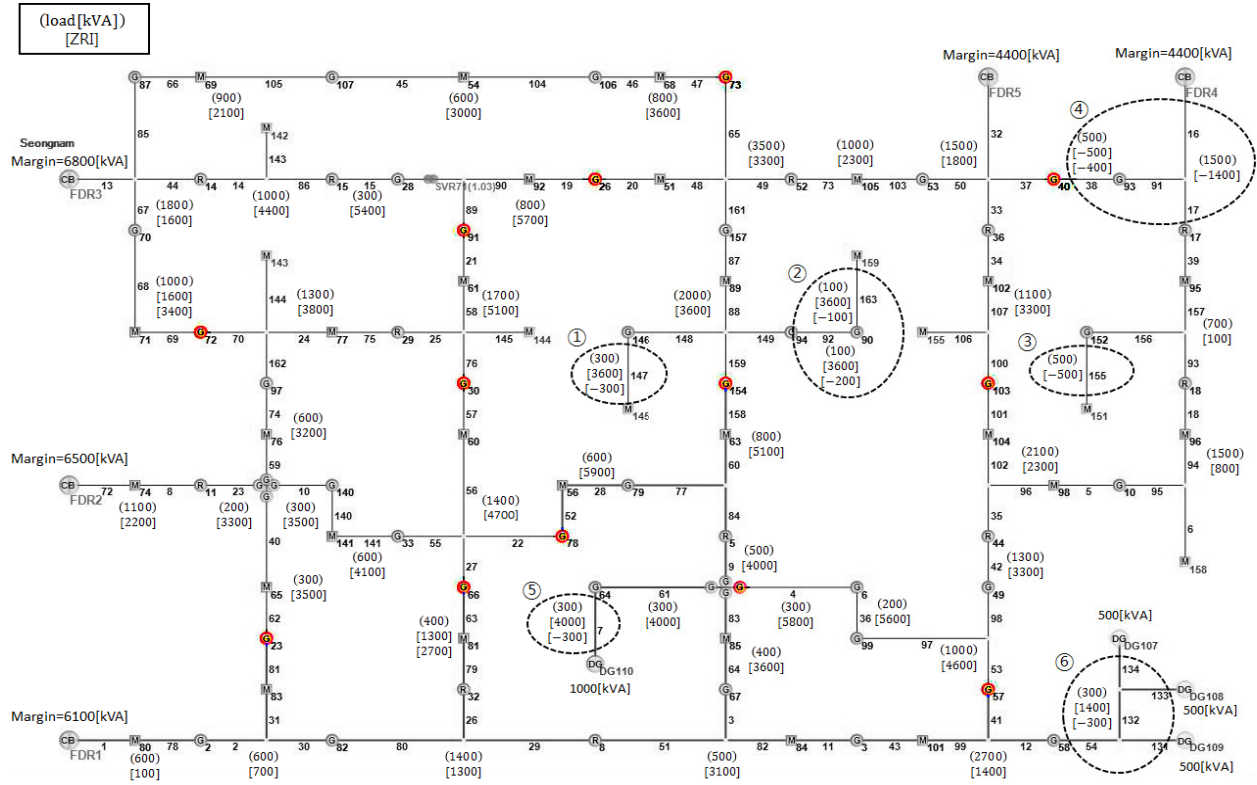


그림 12 시뮬레이션 계통  
Fig. 12 A simulation system

에 피더를 추가로 연계하여 개선할 수 있다.

FDR4 선로의 ③번(구간 155)은 말단구간으로 복구가 안될 가능성을 내포하고 있으며 연계구간 93, 156과 157의 여유용량이 구간 155를 부담할 만큼 충분하지 않아 위험성이 ZRI를 통해 보여진다. 이는 다른 피더를 말단구간에 연계하여 보완할 수 있다.

분산전원은 고장발생 시 단독운전 방지차원에서 운전을 중단하므로 FDR1 선로의 연계된 DG110, 107, 108, 109는 연계피더가 없는 말단으로 간주된다. 이는 연계된 구간에 적용되어 ZRI가 나타내어진다. 따라서 ⑤번(구간 7)은 구간 61에 고장발생 시, ⑥번(구간 54, 131, 132, 133, 134)은 구간 12, 41, 43, 99에 고장발생 시 계통 구조상 복구가 될 수 없는 위험성을 내포하고 있다는 것을 알 수 있다.

사례연구 결과 시뮬레이션 계통을 검토할 수 있었으며, 계통운영과 계통구조 상황에 따른 복구가 취약한 구간을 확인할 수 있었다. 이는 제안한 배전계통상정사고 해석법이 고장이 발생하기 전 계통 내에 복구가 가능하지 않는 구간을 사전에 검토하는데 적합하다는 것을 검증하였다.

#### 4. 결 론

본 논문은 고장을 상정하여 선로의 계통 위험여부를 지수화

하여 나타내는 송전계통 상정사고해석의 개념을 도입하여 복구가 취약한 구간을 미리 알아보기 위해 배전계통에 고장을 상정하여 계통을 해석하는 배전계통 상정사고 해석법을 제안하였다. 본 논문은 참고문헌[1]에 제시된 복구지수를 활용하였으며 복잡한 배전계통의 운용상황을 파악하기 위해 한 선로가 동일선로에 2연계 이상 연계된 경우와 분산전원이 연계된 경우의 구간복구지수를 구하는 방법을 추가로 제안하였다. 따라서 부하측 정전구간의 복구가능성을 평가하여 복구가 취약한 구간을 미리 파악할 수 있어 계통 운영과 계통구조 상황을 평가할 수 있다. 앞으로 제안된 해석법을 활용하여 사전에 운영 대책을 수립한다면 신속한 정전복구를 할 수 있다고 사료된다.

최근 배전계통은 전력수요의 증가로 점점 더 복잡해지며 고장 발생 시 전력공급에 큰 차질을 생길 수 있어 배전계통 상정사고 해석의 중요성이 대두되고 있다. 제안한 해석법은 복잡한 계통을 해석하기에 어려운 경우가 있으며 추후 이를 보완한 해석법이 필요하다 고 사료된다. 제안된 배전계통 상정사고 해석법을 적용하여 시간적으로 확인할 수 있게 기술이 개발 된다면 운영자가 계통의 상황을 실시간으로 인지하여 계통에 문제가 발생하기 전에 미리 설비 점검 및 고장조치를 취할 수 있다. 또한 계통 계획측면에서 설비를 증설하기 전에 증설 후 계통 변화 분석하여 대책을 수립한다면 설비의 이용률을 극대화하여 계통을 구성할 수 있다고 사료된다.

**감사의 글**

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No.20154030200770)

**References**

- [1] Seong-II Lim, Bo-Gun Jin and Seung-Jae Lee, "A New Evaluation Methodology of Service Restoration Capability in Distribution Systems," The Tran.KIEE A, vol 51, No. 7, pp. 333-340, July. 2002
- [2] Yoon-Sung Cho and Sang-Yun Yun, "Development of the Contingency Analysis Program of Korean Energy Management System," The Tran. KIEE, vol. 59, No. 2, pp. 232-241, Feb. 2010
- [3] Kyu-Hong Park, Jai-Kil Jung, Seung-Bum Hyun, In-Yong Lee and In-Hak Jung, "Contingency Ranking Technique Using Line Capacity Calculation Method," The KIEE Summer Conference, pp. 285-288, July. 2000
- [4] Joo-Cheon Bae and Ib-Kyoung Kim, "Current Status of Power System Operation in Korea and Prevention Measure for Wide-Area Blackout," The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 52 No. 11, pp. 50-54, Nov. 2003
- [5] Heung-Jae Lee, Kyeong-Seob Lee and Sung-Min Park, "An Expert System for the Restoration of Distribution Networks," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 17, No. 3, pp. 87-94, May. 2003
- [6] Jin Hwan Kim, Il Hyung Lim, Seung Jae Lee, Myeon Song Choi, Seong Il Lim, Sang Tae Kim and Bo Gun Jin, "Vulnerability Evaluation for Monitoring Wide Area Outage in Transmission Systems," The Tran. KIEE, vol.59, No. 3, pp. 506-514, March. 2010
- [7] Byung-Seop Kim, Joong-Rin Shin and Jong-Bae Park, "A Study on the Optimal Routing Technique for the Improvement of Voltage Stability in Radial Power System," The Tran. KIEE A, vol. 51, No. 11, pp. 568-576, Nov. 2002
- [8] Akhtar Hussain, Chang-Ju Seok, Myeon-Song Choi, Seung-Jae Lee and Seong-IL-Lim, "Line Security Evaluation of WANS Considering Protectability of Relays and Vulnerability of Lines," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 9, No. 6, pp. 1864-1872, Nov. 2014
- [9] J. U. Kim, Y. H. Moon and J. G. Lee, "Double Circuit Simultaneous Fault Analysis," The KIEE Summer Conference, pp. 136-138, July. 2002
- [10] Nam-Hun Cho, Young-Jae Jeon, Yong-Huei Han and Byoung-Sung Han, "Analysis of the Load Transfer Capacity and Study of Conductor Sizes for Contingency Levels in Distribution Systems," The Tran. KIEE, vol. 52A, No. 7, pp. 363-370, July. 2003
- [11] Jung-Soo Seo, Hyung-Seung Kim, Seong-II Lim, Myeon-Song Choi and Seung-Jae Lee, "An Improved Algorithm of Fault Indicator Generation of FRTU in Distribution Automation System," The Tran. KIEE, vol. 63, No. 10, pp. 1354-1363, Oct. 2014
- [12] Je-Ho Lee, Hyun-Jun Lee, Joon-Seok Oh, Ui-Young Jeong, Seong-Duc Ma and Jae-Eon Kim "Research on control method of Distributed Generation," The KIEE Summer Conference, pp.525-526, July.2014
- [13] Jeong-Eun Park, Hyung-Seung Kim, Myeon-Song Choi and Seung-Jae Lee, "Distribution contingency analysis considering restoration capability," The KIEE Summer Conference, pp. 318-320, July. 2015
- [14] R. Podmore, "Smart Grid Restoration Concepts," Power and Energy Society General Meeting, 2010
- [15] R. Ramanathan and Brian Tuck, "Contingency Analysis Using Node/Breaker model for Operation Studies," Power and Energy Society General Meeting, 2015
- [16] C. I. F. Agreira, C. M. M. Ferreira, J. A. D. Pinto and F. P. M. Barbosa, "Contingency Screening and Ranking Algorithm Using Two Different Sets of Security Performance Indices," IEEE Bologna PowerTech Conference, June. 2003
- [17] M. A. Albuquerque and C. A. Castro, "A contingency ranking method for voltage stability in real time operation of power systems," IEEE Bologna PowerTech Conference, June. 2003

**저 자 소 개**



**박 정 은(Jeong-Eun Park)**

1991년 3월생. 2015년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2015~등 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 031-330-6815

E-mail : je1351@naver.com





**김형승(Hyung-Seung Kim)**

1989년 2월생. 2013년 명지대학교 전기공학과 졸업. 현재 명지대학교 전기공학과 석박사 통합과정.

Tel : 031-330-6815

E-mail : hskim369@nate.com



**현승호(Seung-Ho Hyun)**

1962년 10월생. 1991년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공석). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996-2002년 한국철도기술연구원 책임연구원. 2002-2004 명지대학교 전기공학과 차세대 전력기술연구센터 연구 교수. 현재 울산대학교 전기전자정보시스템 공학부 조교수.

Tel.: 052-259-1277

E-mail : takeitez@ulsan.ac.kr



**최면송(Myeon-Song Choi)**

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

Tel : 031-336-3290

Fax : 031-330-6816

E-mail : mschoi@mju.ac.kr



**이승재(Seung-Jae Lee)**

1955년 11월생. 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

Fax : 031-330-6816

E-mail : sjlee@mju.ac.kr



**임성일(Seong-Il Lim)**

1967년 7월생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004-2005년 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터 연구 교수. 현재 경남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 055-249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr