

## 전력품질을 고려한 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석

(A Reliability Analysis in LVDC Distribution System Considering Power Quality)

노철호\* · 김충모 · 김두용 · 권기현 · 오윤식 · 한 준 · 김철환\*\*

(Chul-Ho Noh · Chung-Mo Kim · Doo-Ung Kim · Gi-Hyeon Gwon ·  
Yun-Sik Oh · Jun Han · Chul-Hwan Kim)

### Abstract

Recently, DC-based power system is being paid attention as the solution for energy efficiency. As the example, HVDC (High Voltage DC) transmission system is utilized in the real power system. On the other hand, researches on LVDC (Low Voltage DC) distribution system, which are including digital loads, are not enough. In this paper, reliability in LVDC distribution system is analyzed according to the specific characteristics such as the arrangement of DC/DC converters and the number of poles. Furthermore, power quality is also taken account of since LVDC distribution system includes multiple sensitive loads and electric power converters. In order to achieve this, LVDC distribution systems are modeled using ElectroMagnetic Transient Program (EMTP) and both the minimal cut-set method and Customer Interruption Cost (CIC) are used in the reliability analysis.

Key Words : Bipolar, Customer Interruption Cost, DC/DC converter, LVDC Distribution System, Reliability, Unipolar

### 1. 서 론

최근 전력계통을 에너지 측면에서 효율적으로 운영하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기존 교류 기반의 전력계통을 직류화하기 위한 연구가 이에 포함된다. 직류 전력계통은 전력전자기술의 발달과 더

불어 전압 변성과 관련된 문제를 해결함으로써 그 가능성을 보였다. 또한 신·재생 에너지를 이용한 분산전원과 직류 기반의 디지털 부하가 점차적으로 증가하는 추세이며, 이는 직류 전력계통을 구축할 경우 전력변환 단계의 감소를 통해서 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다[1]. 실제로 국내외에서 장거리 송전을 위한 High Voltage DC (HVDC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라 이미 실제 계통에 적용되었으며[2], 그 예로 국내의 해남-제주나 북유럽의 사례를 들 수 있다. 하지만 수용가와 밀접하게 연관되는 Low Voltage DC (LVDC) 배전계통과 관련된 표준 및 연구는 여전히 부족한 실정이다.

\* Main author : Master course, College of Engineering, Sungkyunkwan University

\*\* Corresponding author : Professor, College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Tel : 031-290-7124, Fax : 031-299-4137

E-mail : hmwkim@hanmail.net

Received : 2014. 12. 12

Accepted : 2015. 2. 27

본 논문에서는 LVDC 배전계통의 구축에 기여하기 위하여 전력품질을 고려한 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석을 수행하였다. 신뢰도 분석은 계통 구축에 필수적인 요소를 반영하여 평가할 수 있는 연구 방법으로 적정도, 안전성, 그리고 전력품질의 세 가지 요소를 포함하고 있다[3]. 다수의 민감부하와 전력변환기기를 포함하는 LVDC 배전계통의 경우, 기존의 교류 배전계통보다 전력품질 측면에서 더욱 큰 영향을 받을 수 있기 때문에 전력품질을 고려한 신뢰도 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 직류계통의 전력품질 측면에서 가장 중요한 요인인 순시 전압강하를 중점으로 고려하였다. 또한 DC/DC 컨버터의 배치나 극 수에 따른 계통의 분류와 같이 기존의 교류 배전계통과 차별된 LVDC 배전계통 고유의 특징에 초점을 맞추어 신뢰도 분석을 수행하였다.

## 2. LVDC 배전계통의 분류

### 2.1 DC/DC 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통의 분류

LVDC 배전계통에서 DC/DC 컨버터는 정류된 전압을 수용가가 원하는 전압레벨로 강압하기 위한 필수적인 구성요소이다. 이러한 DC/DC 컨버터의 배치에 따라서 LVDC 배전계통을 하나의 대용량 DC/DC 컨버터가 전체 수용가 앞 단에 설치되는 컨버터 중앙집중 설치형과 각 부하점 앞에 개별적으로 설치되는 컨버터 개별분산 설치형으로 분류할 수 있다. 그림 1은 DC/DC 컨버터의 배치에 따른 LVDC 배전계통의 개념도이며, 그림 1 (a)는 컨버터 중앙집중 설치형, 그림 1 (b)는 컨버터 개별분산 설치형을 나타낸다.

컨버터 중앙집중 설치형과 컨버터 개별분산 설치형은 설치된 DC/DC 컨버터의 위치에 따라서 선로 상에 공급되는 배전 전압레벨이 달라진다. 상대적으로 낮은 배전 전압레벨을 갖는 컨버터 중앙집중 설치형의 경우, 동일한 전력을 수용가에 공급하기 위해서는 보

다 높은 크기의 전류가 흘러야 한다. 이는 결과적으로 선로에서의 전력손실 및 전압강하, 그리고 도체 단면적 측면에 부정적인 영향을 미친다. 반면에 컨버터 개별분산 설치형에서는 이러한 점을 보완할 수는 있으나, 각 부하점마다 DC/DC 컨버터를 설치해야 하기 때문에 경제적인 부담이 증가하는 단점을 가지고 있다.

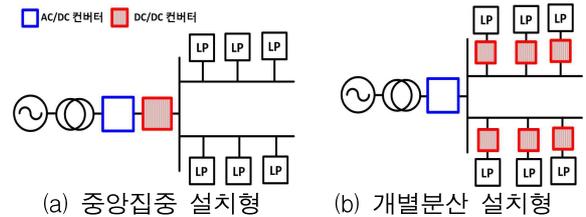


그림 1. 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통  
Fig. 1. LVDC distribution system according to the arrangement of DC/DC converters

### 2.2 극 수에 따른 LVDC 배전계통의 분류

LVDC 배전계통은 극 수에 따라서 단극성과 양극성으로 분류할 수 있다. 단극성 계통의 경우 (+)도체와 (-)도체로 구성되어 있으며, 양극성 계통의 경우 (+)도체, (-)도체, 그리고 중성도체로 구성되어 있다. 그림 2는 극 수에 따른 계통 구성의 차이를 보여주기 위한 개념도이며, 단극성 계통과 양극성 계통을 각각 그림 2 (a)와 그림 2 (b)에서 확인할 수 있다.

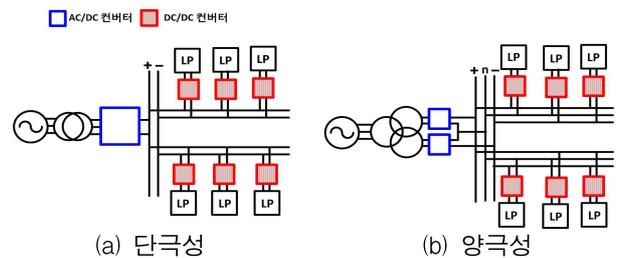


그림 2. 극 수에 따른 LVDC 배전계통  
Fig. 2. LVDC distribution system according to the number of poles

단극성 계통은 두 개의 상도체로 구성되어 있기 때문에 하나의 전압레벨만을 구현 가능하지만, 양극성

계통은 중성도체가 존재하기 때문에 부하 연결방식에 따라 다양한 전압레벨을 구현 가능할 뿐만 아니라 중간점 접지를 통해서 대지전압을 절반으로 줄일 수 있는 장점이 있다[4]. 하지만 양극성 계통은 단극성 계통과는 달리 각 극에 연결된 부하량에 따라 전압 불평형이 발생할 수 있으며, 복잡한 구성으로 인해 경제성이 낮은 단점이 있다.

### 3. 전력품질을 고려한 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석

#### 3.1 수용가 정전비용 $CIC$

기존의 신뢰도 분석 방법의 경우 일반적으로 장기적인 가치를 평가하기 위한 신뢰도 지수를 적용하여 영구정전만을 고려하였다. 하지만 LVDC 배전계통의 경우 다수의 민감부하 및 전력변환기기를 포함하고 있기 때문에 전력품질 문제로 인한 순시정전을 고려하지 않을 경우 정확한 신뢰도 분석을 수행할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 전력품질이나 전력공급의 문제로 인해 수용가가 정전을 경험할 때 발생하는 비용을 평가할 수 있는 수용가 정전비용 ( $CIC$ , Customer Interruption Cost)을 적용하였다[5].  $CIC$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$CIC = CDF \times U_i \tag{1}$$

고객손실함수( $CDF$ , Customer Damage Functions)는 정전 지속시간에 대한 단위전력 당 비용의 함수를 의미하며, 본 논문에서는 참고한 데이터는 표 1과 같다[6].  $U_i$ 는 비가용률로 해당 부하가 1년 동안 정상적으로 동작하지 못하는 시간을 의미하며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.  $\lambda_i$ 와  $r_i$ 는 각각 해당 부하점에 영향을 미치는 구성 요소  $i$ 의 고장률과 복구시간을 나타내며, 각 구성 요소에 대한 고장률 및 복구시간은 표 2와 같다[7].

$$U_i = \sum_i \lambda_i r_i [\text{hour/year}] \tag{2}$$

표 1. 고객손실함수 (단위:원) [6]  
Table 1. Customer Damage Function (unit : won) [6]

수용가 종별	정전 지속시간			
	1분	20분	1시간	4시간
소규모수용가	626	2,941	4,585	17,104

표 2. 구성요소에 따른 고장률과 복구시간 [7]  
Table 2. Failure rates and Mean Time To Repair (MTTR) according to type of components [7]

구성요소	고장률 [freq/yr]	복구시간 [hr/freq]
변압기	0.00111	5.00
AC/DC 컨버터	0.00447	16.00
DC/DC 컨버터	0.00482	26.00
케이블(600V 초과)	0.00774[km]	15.70
케이블(600V 이하)	0.00659[km]	11.22

본 연구에서는 다음의 절차를 통하여  $CIC$  계산이 수행되었다.

- 1단계 : ElectroMagnetic Transient Program (EMTP)를 이용하여 모델링 된 LVDC 배전계통에 대한 시뮬레이션을 수행하여, 고장 및 보호기기 동작에 따른 정전구역을 분류한다. 자세한 내용은 3.2절에서 추가적으로 언급된다.
- 2단계 : minimal cut-set 방식을 이용하여 시뮬레이션 결과에 기반한 신뢰도 블록다이어그램을 작성한다. minimal cut-set 방식은 고장 발생 시 특정 부하점에 공급 중단을 유발하는 계통 구성요소들의 집합을 이용하여 분석하는 방법으로, 해당 부하점에 정전을 유발시키는 구성요소들을 파악하기 용이하다는 장점이 있다[8]. 예를 들어 DC/DC 컨버터와 선로 1에 고장이 발생할 경우 부하점 1에 영구정전이 발생한다면, 그림 3과 같은 신뢰도 블록다이어그램을 얻을 수 있다.
- 3단계 : 작성된 신뢰도 블록다이어그램을 기반으로 각 부하점에 대한 비가용률을 구한다. 비가용률은 식 (2)를 통해서 얻을 수 있으며, 그림 3의 경우 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{LP1} = \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 \text{ [hour/year]} \quad (4)$$



그림 3. Minimal cut-set 방식을 통한 신뢰도 블록다이아그램

Fig. 3. Reliability block diagram by minimal cut-set method

- 4단계 : 1~3단계를 거쳐서 계산된 각 부하점에 대한 비가용률에 [6]의 CDF를 적용하여 식 (1)과 같이 CIC를 계산한다. 그 후 각 부하점의 부하량을 고려하여 계통에 대한 영구정전비용과 순시정전비용을 얻을 수 있다. 영구정전비용은 고장 발생 시 부하점에 대한 공급이 차단되어 발생하는 영구정전에 따른 비용을, 순시정전비용은 차단기의 동작(개방-투입) 혹은 순시정전감하에 의해 발생한 순시정전에 따른 비용을 나타낸다.

### 3.2 EMTP를 이용한 LVDC 배전계통 모델링

본 절에서는 EMTP를 이용하여 전력회사에서 공급되는 교류전압 22.9kVAC를 변압기와 AC/DC 컨버터를 이용하여 1500V<sub>DC</sub>로 정류한 후, DC/DC 컨버터를 이용하여 수용가가 요구하는 380V<sub>DC</sub>의 전압레벨로 강압하는 방식으로 구성되는 모의 계통을 모델링하였다. 총 3가지의 LVDC 배전계통이 모델링되었다. 그림 4와 그림 5는 각각 단극성을 갖는 컨버터 중앙집중 설치형과 컨버터 개별분산 설치형을 나타내며, 컨버터 배치에 따른 신뢰도 분석에 활용된다. 또한 극수에 따른 분석을 위하여 추가적으로 그림 6의 컨버터 개별분산 설치형을 갖는 양극성 모의 계통을 구성하였다. 그림 4~6에서 CB는 차단기, SW는 개폐기, MCCB는 배선용 차단기, 그리고 LP는 부하점을 의미한다. 일반적으로 주기적으로 0V가 되는 교류계통과 달리 직류계통에서는 차단이 어려운 문제점이 있다. 하지만, LVDC의 차단은 교류 보호기기 제작사에서 제공하는 적절한 교정치를 적용하여 직류차단기로 사

용할 수 있기 때문에 직류용 보호기기를 적용할 필요가 없다[9].

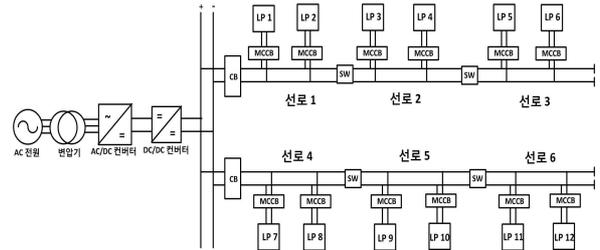


그림 4. 단극성 컨버터 중앙집중 설치형 LVDC 배전계통

Fig. 4. Unipolar LVDC distribution system with centralized converter

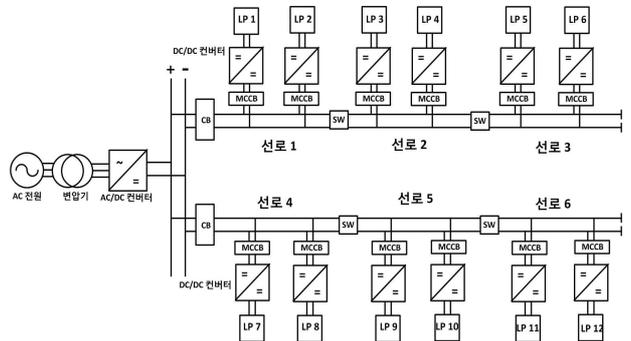


그림 5. 단극성 컨버터 개별분산 설치형 LVDC 배전계통

Fig. 5. Unipolar LVDC distribution system with individual converters

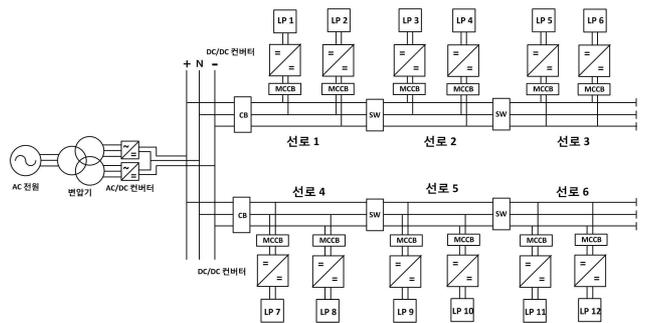


그림 6. 양극성 컨버터 개별분산 설치형 LVDC 배전계통

Fig. 6. Bipolar LVDC distribution system with individual converters

모의 계통에서 각각의 부하점은 모두 20kW의 용량을 가지며 각 선로의 길이는 200m로 가정하였다. 고장에 따른 정전구역을 분류하기 위하여, 각 구성요

소에서 발생할 수 있는 고장과 선로에서 발생할 수 있는 Pole-to-Ground (PTG) 고장과 Pole-to-Pole (PTP) 고장이 고려되었으며, 양극성 계통에서는 Pole-to-Neutral (PTN) 고장이 추가적으로 고려되었다. 또한 주어진 모의 계통들에 대한 보호방식은 기존의 교류 배전계통을 참고하여 다음과 같이 적용하였다.

- 전력변환기기 고장 : 내부 차단기 동작
- 간선 고장 : 차단기와 개폐기 동작을 통한 고장 구간 격리
- 분기선 고장 : 배선용 차단기 동작

### 3.3 전력품질을 고려한 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석

#### 3.3.1 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석

그림 4와 그림 5의 모의 계통에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 7은 영구정전비용 측면에서 컨버터 배치에 따른 신뢰도를 분석한 것으로 컨버터 중앙집중 설치형이 컨버터 개별분산 설치형보다 약 6% 적은 영구정전비용을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 [7]에 알 수 있듯이 선로에 인가되는 전압레벨에 따라 선로의 고장률 및 복구시간이 달라지기 때문이다. 그림 8은 순시정전비용 측면에서 신뢰도를 분석한 결과로 컨버터 중앙집중 설치형이 컨버터 개별분산 설치형보다 약 65% 적은 정전비용을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 선로 고장이 AC/DC 컨버터에 미치는 영향에 따른 결과이다. 선로 고장이 발생한다면 등가저항 감소에 따라 전체 부하량이 증가한 것과 같은 상태가 되는데, 이로 인해 전체 부하량이 AC/DC 컨버터의 용량을 초과할 경우 AC/DC 컨버터는 제어능력을 상실할 수 있다. 부하량과 전압의 관계( $P \propto V^2$ )를 통해 배전 전압이 클수록 AC/DC 컨버터의 제어능력이 더욱 쉽게 상실될 수 있음을 알 수 있고, 따라서 컨버터 개별분산 설치형은 컨버터 중앙집중 설치형에

비하여 높은 순시정전비용이 발생하게 된다. 이를 통하여 선로에 인가되는 전압의 차이(컨버터 중앙집중 설치형은 380V<sub>DC</sub>, 컨버터 개별분산 설치형은 1500V<sub>DC</sub>)가 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통의 신뢰도에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다. 또한, minimal cut-set 방식을 통한 신뢰도 분석은 수용가의 관점에서 이루어지기 때문에 중앙집중 설치형과 개별분산 설치형에서 컨버터 고장에 따른 정전범위의 차이는 신뢰도 결과에 영향을 미치지 않음을 추가적으로 확인할 수 있다.

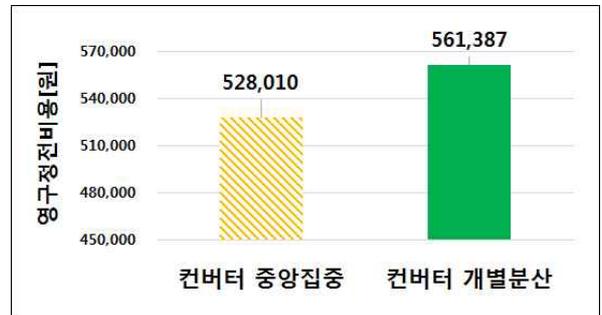


그림 7. 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통의 영구정전비용 비교  
Fig. 7. Sustained interruption cost according to the arrangement of DC/DC converters

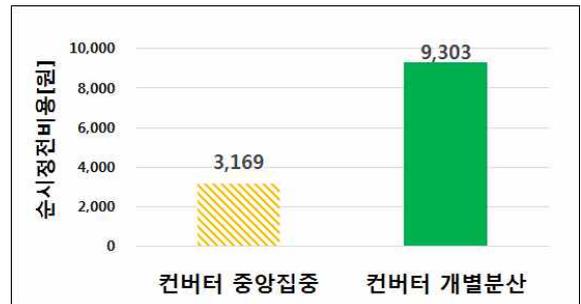


그림 8. 컨버터 배치에 따른 LVDC 배전계통의 순시정전비용 비교  
Fig. 8. Short duration interruption cost according to the arrangement of DC/DC converters

결과적으로 컨버터 개별분산 설치형은 정상상태에서 낮은 전압강하 및 선로손실 등을 통해서 전력을 공급할 수는 있으나, 컨버터 중앙집중 설치형보다 신뢰도가 낮기 때문에 실제 LVDC 배전계통에 적용하기

위해서는 충분한 보호협조 및 전력품질 개선 대책이 적용되어야 함을 알 수 있다.

### 3.3.2 극 수에 따른 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석

그림 5와 그림 6의 모의 계통에 대하여 수행된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 극 수에 따른 LVDC 배전계통의 신뢰도 분석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림 9는 영구정전비용 측면에서 극 수에 따른 신뢰도를 분석한 것으로 단극성 계통이 양극성 계통보다 약 7% 적은 영구정전비용을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 한 대의 AC/DC 컨버터의 영향만을 받는 단극성 계통의 부하점들과 달리, 양극성에서는 두 대의 AC/DC 컨버터 모두에 영향을 받는 두 개의 상도체에 연결된 부하점들(LP5, LP6, LP11, LP12)이 존재하기 때문이다. 그림 10은 순시정전비용 측면에서 신뢰도를 분석한 결과로 양극성 계통이 단극성 계통보다 약 25% 적은 정전비용을 갖는다. 이는 두 계통이 선로 구성에 따라 고장 종류 및 부하 연결방식의 차이가 발생하는데, 그로 인해 선로고장 발생 시 인접선로에서 순시전압강하를 경험하는 부하점의 수에 차이가 발생하기 때문이다. 단극성 계통의 경우, 선로 고장이 발생할 경우 인접선로의 모든 부하점에서 순시전압강하가 발생하게 되고 이로 인해 순시정전을 경험하게 된다. 반면에 양극성 계통의 경우, 선로 고장이 발생하더라도 인접선로의 일부 부하점(예를 들어 (+)도체에 PTG 고장이 발생할 경우, 인접선로에서 (-)도체에 연결된 부하점들은 순시전압강하에 의한 순시정전을 경험하지 않는다.)만이 순시전압강하를 경험하게 된다. 따라서 양극성 계통의 경우, 3권선 변압기와 2대의 DC/DC 변압기를 이용하여 (+)도체와 (-)도체에 대해서 개별적으로 전압을 유지하기 때문에 순시전압강하에 의한 순시정전비용은 적게 나타남을 알 수 있습니다. 이러한 결과를 바탕으로 선로 구성 및 AC/DC 컨버터의 수의 차이에 의해 극 수에 따른 LVDC 배전계통의 신뢰도가 달라짐을 확인할 수 있다. 추가적으로 단극성 계통과 양극성 계통은 변압기의 형태도 각각 2권선 변압기와 3권선 변압기로 다르지만, [7]에 따르면 변압기의 고장률과 복구시간

은 용량에만 영향을 받기 때문에 신뢰도 측면에서는 차이가 없다.

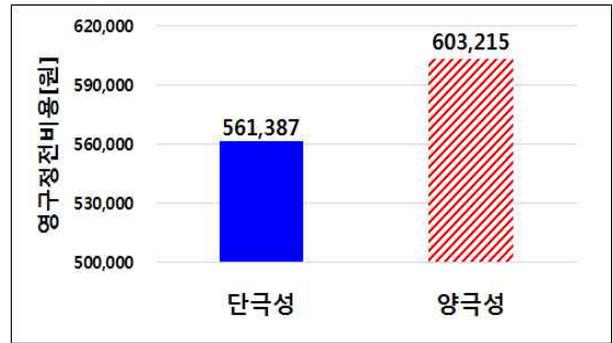


그림 9. 극 수에 따른 LVDC 배전계통의 영구정전비용 비교

Fig. 9. Sustained interruption cost according to the number of poles

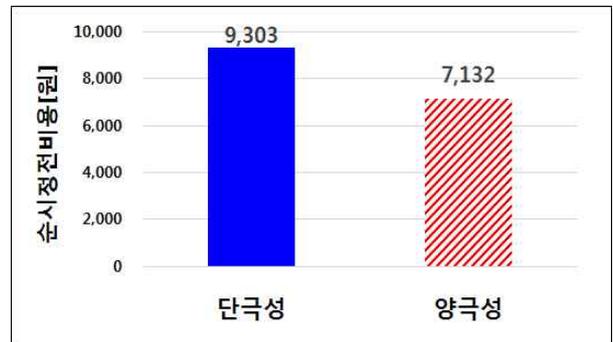


그림 10. 극 수에 따른 LVDC 배전계통의 순시정전비용 비교

Fig. 10. Short duration interruption cost according to the number of poles

결과적으로 복잡한 계통 구성을 갖는 양극성의 경우 영구정전 측면에서는 낮은 신뢰도를 갖지만, 오히려 다양한 부하연결방식을 통해 부하점에 미치는 순시전압강하의 영향을 감소시켜 순시정전 측면에서는 단극성 계통보다 높은 신뢰도를 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서, 양극성 계통은 Internet Data Center (IDC)나 산업용 수용가와 같은 전력품질의 영향이 매우 중요하게 고려되는 수용가에서 적합하고 주거용 수용가와 같이 상대적으로 전력품질의 영향이 적게 고려되는 수용가에 대해서는 단극성 계통이 적합함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전력품질을 고려한 LVDC 배전시스템의 신뢰도 분석을 수행하였으며, DC/DC 컨버터 배치나 극 수와 같은 기존의 교류 배전시스템에서 논의하지 못한 특성에 초점을 맞추었다. 또한 LVDC 배전시스템을 DC/DC 컨버터 배치에 따라서 컨버터 중앙집중 설치형과 컨버터 개별분산 설치형으로 분류하였으며, 극 수에 따라 단극성 계통과 양극성 계통으로 분류하였다. 분류된 LVDC 배전시스템에 따른 고장 시의 영향을 분석하기 위하여 EMTP로 모의계통을 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션 결과에 minimal cut-set 방식을 적용하여 신뢰도 블록다이어그램을 작성하였다. 이를 바탕으로 CIC를 영구정전비용과 순시정전비용으로 나누어서 계산하였다. 신뢰도 분석 결과는 다음과 같다.

- 컨버터 개별분산 설치형은 컨버터 중앙집중 설치형보다 적은 전압강하와 선로손실을 통해 정상 상태에서 안정적으로 전력을 공급할 수는 있는 장점이 있다. 하지만 컨버터 중앙집중 설치형보다 신뢰도가 낮기 때문에 실제 LVDC 배전시스템에 적용하기 위해서는 충분한 보호협조 방식 및 전력품질을 개선하기 위한 대책이 필요하다.
- 양극성 계통의 경우 복잡한 구성 때문에 영구정전 측면에서의 신뢰도는 단극성보다 낮다. 하지만, 양극성에서는 다양한 부하 연결방식을 통해서 순시전압강하와 같은 전력품질의 악영향을 경험하는 부하점의 수를 낮출 수 있기 때문에 오히려 순시정전 측면의 신뢰도는 높다. 따라서 전력품질이 중요한 요소로 고려되는 IDC나 산업용 수용가와 같은 곳에서는 양극성 계통이 더욱 적합함을 알 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20131010501750)입니다.

#### References

- [1] Kyoung-Ho Lee, "Low Voltage DC Distribution Technology for the Green Building", KIPE Magazine, Vol.15, No.5, pp.32-39, 2010.
- [2] Michael P. Bahrman, "Overview of HVDC Transmission", 2006 IEEE PSCE, pp.18-23, 2006.
- [3] The Korean Institute of Electrical Engineers, Distribution Engineering, Bookshill, 2011.
- [4] Yun-Sik Oh, Jun Han, Gi-Hyeon Gwon, Doo-Ung Kim, Chul-Ho Noh, Tack-Hyun Jung, Chul-Hwan Kim, "Analysis of Human Safety and System Effect according to Grounding Scheme in LVDC Distribution System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.63, No.5, pp.608-614, 2014.
- [5] Hee-Tae Lee, Jong-Fil Moon, Kyu-Hwan Seol, Sang-Yun Yun, Jae-Chul Kim, "Evaluation of Reliability Worth Considering Sustained Interruptions and Voltage Sags", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.22, No.5, pp.13-20, May 2008.
- [6] L. Goel, R. Billinton, R.Gupta, "Basic Data and Evaluation of Distribution System Reliability Worth", WESCANEX '91 IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment, May 1991.
- [7] IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Standard 493, 2007.
- [8] Timothy Coyle, Robert G. Arno, Peyton S. Hale, "Application of the Minimal Cut Set Reliability Analysis Methodology to the Gold Book Standard Network", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, May 2002.
- [9] Kyoung-Ho Lee, "The Trend and Safety Measures of DC Distribution", KIPE Magazine, Vol.14, No.2, pp.21-26, April 2009.
- [10] Kyu-Hwan Seol "Evaluation of Power Distribution System Reliability Worth considering Voltage Sags caused by Reclosing", Ph.D. dissertation, Univ. Soongsil, 2007.
- [11] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, Jarmo Partanen, "An LVDC Distribution System Concept", Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics(NORPIE/2008), June 2008.
- [12] Tero Kaipia, Pasi Salonen, Jukka Lassila, Jarmo Partanen, "Possibilities of the Low Voltage DC Distribution Systems", Nordac, Nordic Distribution and Asset Management Conference. 2006.
- [13] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159, 2009.

◇ 저자소개 ◇



**노철호**(盧哲鎬)  
1987년 12월 19일생. 2013년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2013년~동 대학원 정보통신대학 석박통합과정.



**오윤식**(吳潤植)  
1987년 7월 10일생. 2011년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2013년 동 대학원 정보통신대학 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정.



**김충모**(金忠模)  
1985년 10월 4일생. 2011년 아주대 전자공학부 졸업. 2013년~성균관대 대학원 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정.



**한 준**(韓 準)  
1986년 2월 7일생. 2011년 순천향대 정보통신공학부 졸업. 2013년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정.



**김두용**(金杜雄)  
1986년 9월 8일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2012년~현재 동 대학원 정보통신대학 석·박사통합과정.



**김철환**(金喆煥)  
1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대 정보통신대학 교수. 전력IT인력양성센터 센터장.



**권기현**(權起賢)  
1985년 9월 3일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 동 대학원 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정.