

저압직류 배전계통의 구성 형태를 고려한 공급신뢰도 분석에 관한 연구

(A Study on the Reliability Analysis in LVDC Distribution System Considering Layout)

김충모* · 노철호 · 한 준 · 오윤식 · 김현수 · 백인호 · 김철환**

(Chung-Mo Kim · Chul-Ho No · Joon Han · Yun-Sik Oh · Hyun-Soo Kim · In-Ho Baek · Chul-Hwan Kim)

Abstract

At the end of the 19th century, Edison's DC power system and Tesla's AC power system was debated in power market. Finally, AC system became the primary system of the power market because both step-up and step-down of voltage by using transformer and long-distance power transmission are easily possible. However, nowadays the power market takes some action for introducing DC system. Both domestic and foreign researchers are conducting the study on the DC system as well. Some researchers have conducted the studies on power quality and economic evaluation of the DC distribution system but DC distribution system is still controversial in terms of the effectiveness and reliability. In this paper, we calculate the reliability indices of the Low Voltage Direct Current(LVDC) distribution system considering arrangement of power electronics, layout of the distribution system, and distance between load points.

Key Words : Converter Arrangement, LVDC Distribution System, Reliability Index, System Layout

1. 서 론

초기의 전력시장은 직류 시스템을 이용한 소규모의 분산전원 계통으로 구성되었다. 하지만, 변압기의 발명 이후 직류 시스템과 교류 시스템의 채택에 관한 논

쟁이 있었다. 결국 변압기에 의해 쉽게 승압 및 강압이 가능하며 동시에 효율적인 장거리 전력 전달이 가능한 교류방식이 채택되어 현재까지 널리 쓰이고 있다[1]. 하지만, 최근 국내외에서는 직류 시스템에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 현재 전력시장에서는 직류 시스템을 송전계통에서 적용하여 운전 중에 있다. 이 뿐만 아니라 배전계통 분야에서도 직류 시스템을 적용하려는 움직임을 보이고 있다. 이처럼 전력시장에서 저압직류 배전계통을 도입하려는 배경을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 전력전자기술의 발달로 직류전기의 변성이 용이해졌기 때문에 기존의 교류 시스템이 갖는 장점

* 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. 11. 3
Accepted : 2014. 11. 25

이 상대적으로 저감되었다.

- 2) 직류전원으로 동작하는 디지털 부하가 급격하게 증가할 것이라 예상되고 있다. Electric Power Research Institute(EPRI)의 보고서에 따르면 전체 부하의 10%를 차지하고 있는 디지털 부하가 2020년에는 50% 수준에 도달할 것으로 예측하고 있다[2]. 따라서 직류 시스템을 도입하게 되면 불필요한 전력변환 단계를 줄일 수 있다.
- 3) 온실가스 감축을 위해 직류전원 기반의 신재생 에너지가 확대되고 있다. 특히 국가 에너지기본 계획에 따라 2035년까지 국내 총 에너지의 11%를 신재생에너지로 생산한다는 목표를 가지고 있다. 류 시스템은 기존의 교류 시스템보다 신재생에너지원과의 연계가 용이할 뿐만 아니라 에너지 효율을 높여서 온실가스를 감축할 수 있다[3].

직류 배전계통을 실제적으로 도입하기 위해서는 안전성, 경제성 등의 다양한 측면에서 검증이 필요하다. 핀란드의 Lappeenranta University of Technology는 2006년부터 “Power Electronics in Electricity Distribution and DC Distribution” 연구 과제를 수행하였고, 특히 저압직류 배전계통을 통해 전력공급의 품질 향상과 구축비용의 절감 가능성을 제시하였다[4]. 하지만 여전히 저압직류 배전계통의 실효성 및 공급신뢰도 측면에 관하여 논쟁이 있는 것은 사실이다. 기존 교류 배전계통에서의 일반적인 신뢰도 평가에 관한 연구는 Roy Billinton이 수행하였으나[5], 저압직류 배전계통의 신뢰도 평가에 관한 연구는 미비한 실정이며 이에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 기존의 교류 배전계통에서 컨버터를 추가하여 저압직류 배전계통을 구성하였고, 배전계통을 DC/DC 컨버터의 배치, 계통의 구성 형태, 그리고 부하점간의 거리에 따라서 분류하여 신뢰도 지수를 계산하였다. 정확한 신뢰도 지수를 계산하기 위해서는 배전계통을 구성하는 설비들의 고장률과 수리시간 등의 값을 알아야 한다. 이러한 구성요소의 신뢰도 값은 방대한 현장 데이터로부터 산출할 수 있지만, 이는 실제적으로 어려움이 있으므로 본 논문에서는 IEEE Std. 493의 신뢰도 데이터를 사용하였다[6].

2. 저압직류 배전계통의 분류

2.1 DC/DC 컨버터 배치에 따른 분류

저압직류 배전계통은 DC/DC 컨버터의 배치에 따라서 두 가지 형태로 분류할 수 있다[7]. 먼저 각 부하점마다 DC/DC 컨버터를 개별적으로 설치한 컨버터 개별 분산 설치형 방식은 선로에서 전압강하가 발생하더라도 수용가 측에 공급되는 전압을 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있지만, 배전계통에 설치되는 DC/DC 컨버터의 수량이 증가하기 때문에 비교적 경제성이 낮아질 수 있다. 컨버터 중앙 집중 설치형 방식은 전원 측에 대용량의 DC/DC 컨버터가 설치된다. 계통에 필요한 컨버터의 수량이 감소되어 경제적일 수 있지만, 낮은 전압으로 고객에게 전력을 공급하기 때문에 컨버터 개별 설치형 방식보다 전력손실이 커지는 단점이 있다. 그림 1은 DC/DC 컨버터의 배치에 따른 저압직류 배전계통을 나타낸 것이다.

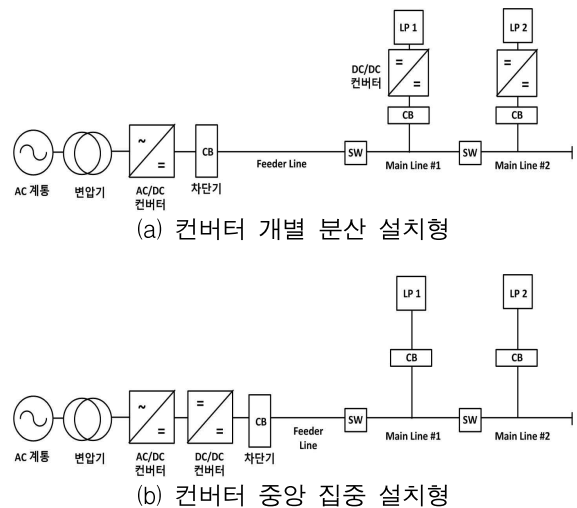


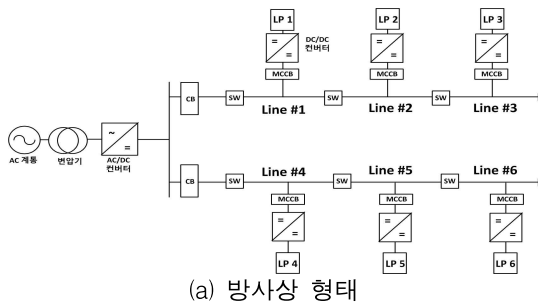
그림 1. DC/DC 컨버터의 배치에 따른 저압직류 배전계통
Fig. 1. LVDC distribution system according to the arrangement of DC/DC converter

2.2 계통의 구성 형태에 따른 분류

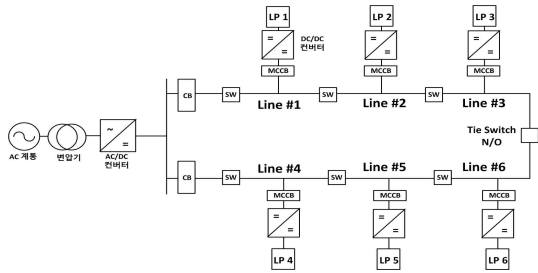
저압직류 배전계통을 구성 형태를 고려하여 방사상,

루프, 스팟 네트워크, 그리드 네트워크 형태의 4가지 토폴로지로 분류하였고, 그림 2에서 이를 나타냈다. 각 토폴로지의 특성은 다음과 같다. 먼저 가장 단순한 구성을 가지는 방사상 형태는 신규 부하 증설이 용이

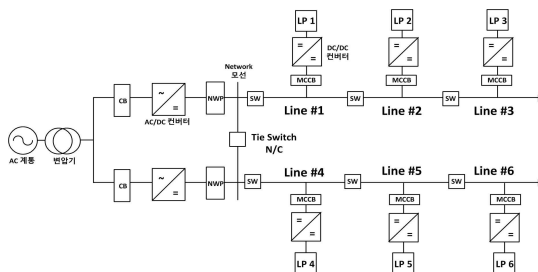
하고 경제적인 공급방식이지만, 선로 고장 시에 고장 지점으로부터 후단에 위치한 부하점이 차단되어 고장이 파급되는 단점이 있다. 루프 형태는 두 개의 선로를 절환 개폐기로 연계하는 방식으로, 선로 고장 시에는 고장 구간을 선택적으로 차단함으로써 정전구간을 축소시킬 수 있는 방식이다. 스팟 네트워크 형태는 높은 신뢰도를 요구하는 단일 집중부하에 전기를 공급하는 네트워크 방식의 일종이다. 이는 2개 이상의 1차 배전선로가 병렬로 연결되는 특징이 있다. 마지막으로 그리드 네트워크 형태는 일반적으로 도심지와 같이 부하밀도가 높은 지역에 전기를 공급하기 위해 적용한다. 이는 신뢰도가 매우 높은 방식으로 우리나라의 경우는 적용되는 사례가 없으나, 미국의 경우는 약 260개 이상의 도시에 적용되고 있는 방식이다[8].



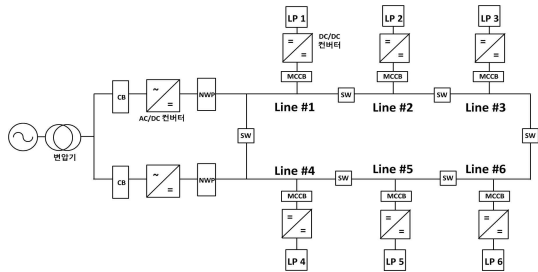
(a) 방사상 형태



(b) 루프 형태



(c) 스팟 네트워크 형태



(d) 그리드 네트워크 형태

그림 2. 배전계통의 구성 형태에 따른 저압직류 배전계통
Fig. 2. LVDC distribution system according to the layout of distribution system

표 1. 배전계통의 구성 형태 및 고장 위치에 따라서 영구정전을 경험하는 지역

Table 1. Sustained Interruption section according to layout of distribution system and faulted location

고장 위치	영구정전을 경험하는 지역					
	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6
Line #1	R L S G	R S	R S			
Line #2		R L S G	R S			
Line #3			R L S G			
Line #4				R L S G	R S	R S
Line #5					R L S G	R S
Line #6						R L S G

※ R : 방사상 형태, L : 루프 형태,
S : 스팟 네트워크, G : 그리드 네트워크

배전계통에서는 구성 형태와 고장이 발생한 위치에 따라서 정전을 경험하는 부하점이 달라진다. 방사상 및 스팟 네트워크 형태와 같은 단방향 전력공급의 구성에서는 선로에 고장이 발생하게 되면 고장지점으로부터의 후단의 부하점이 영구정전을 경험하게 된다.

하지만 루프 및 그리드 네트워크 형태와 같은 양방향 전력공급이 가능한 구성에서는 차단기와 개폐기의 보호협조를 통해 고장이 발생한 구간을 선택적으로 차단하면서 인접 부하에 순간정전을 일으킬 수 있지만 영구정전을 경험하는 지역을 제한할 수 있다. 예를 들면 1번 선로에서 고장이 발생하면 방사상 및 스파트 네트워크 형태에서는 1, 2, 3번 부하점에서 영구정전을 경험하게 된다. 그러나 루프 및 그리드 네트워크 형태에서는 1번 선로에서 고장이 발생하더라도 양방향으로 전력공급이 가능하기 때문에 고장 선로와 직접 연결되는 1번 부하점을 제외한 다른 부하점에서는 영구정전을 경험하지 않는다. 각 구성 형태에 따른 영구정전을 경험하는 지역을 나타내면 표 1과 같다.

3. 저압직류 배전계통의 신뢰도 평가

3.1 일반적인 배전계통의 신뢰도 지수

일반적으로 신뢰도 평가를 위한 기본적인 요소로는 고장률(λ), 수리시간(r), 비가용률(U)이 있다. 고장률(λ)은 전기설비가 어느 정도 고장이 발생할 가능성이 있는지에 대한 평가를 위해 1년을 기준으로 고장이 발생하여 운전을 할 수 없는 빈도를 나타낸다. 수리시간(r)은 어느 정도의 시간동안 고장이 지속되는지를 나타내며, 비가용률(U)은 평균 연간 정전시간을 나타낸다. 본 논문에서는 IEEE Std. 493의 신뢰도 데이터를 참고하여 배전계통의 신뢰도를 평가하였다[6].

고장률(λ), 수리시간(r), 비가용률(U)은 배전계통의 신뢰도를 분석하기 위해 중요한 요소이지만, 이를 통해 계통의 신뢰도 특성을 완전하게 나타내는 것은 어렵다. 따라서 배전계통에서는 정전의 심각성이나 중요성을 판별하기 위해 추가적인 신뢰도 지수를 적용한다. 일반적인 배전계통의 신뢰도 지수로는 수용가 관점의 대표적 지수인 계통 평균정전빈도수(System Average Interruption Frequency Index, SAIFI), 계통 평균정전지속시간(System Average Interruption Duration Index, SAIDI)과 에너지 관점의 신뢰도 지수인 공급지장 에너지(Energy Not Supplied Index, ENS) 등이 있다. SAIFI 및 SAIDI는 전력회사에서 주

로 사용되는 가장 일반적인 신뢰도 지수이다. 계통의 평균정전횟수를 표현하는 SAIFI는 정전사고를 정의하는 기준시간에 따라 신뢰도 지수가 어느 정도의 차이를 보이긴 하지만, 일정지역에서 고객의 정전빈도 관리용으로 많이 사용된다. 또한 계통의 평균정전시간을 나타내는 SAIDI는 비교적 오차가 크지 않고, 고객의 호당정전시간을 관리하는 가장 보편적인 지수이다. 본 연구에서는 정확한 신뢰도 특성을 평가하기 위해 SAIFI, SAIDI를 모두 계산하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1), (2)와 같다.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} [\text{빈도/고객} \cdot \text{년}] \quad (1)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} [\text{시간/고객} \cdot \text{년}] \quad (2)$$

여기서 λ_i : i 부하점의 연간 고장률 [빈도/년]

여기서 N_i : i 부하점의 고객 수 [고객]

여기서 U_i : i 부하점의 연간 비가용률 [시간/년]

ENS는 정전으로 인하여 공급받지 못한 에너지의 양을 나타내며, 에너지 관점의 신뢰도 평가에서 사용되는 신뢰도 지수이다. 본 연구에서는 ENS를 사용하여 저압직류 배전계통에서 에너지 관점의 신뢰도를 평가하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i [\text{kWh/년}] \quad (3)$$

여기서 $L_{a(i)}$: i 부하점의 평균부하 [kW]

3.2 컨버터의 배치에 따른 신뢰도

본 절에서는 저압직류 배전계통에서 DC/DC 컨버터의 배치에 따른 신뢰도 평가를 수행하였다. 일반적으로 신뢰도 평가에서 많이 사용되는 최소 컷셋 방법을 사용하였다[9]. 설비의 고장으로 정전을 경험하는 부하점의 수에 따라서 비가용률(연간 정전시간) 값을 계산하였다. 이를 위해 배전계통을 구성하는 설비의 신

뢰도 데이터는 IEEE Std. 493를 참고하였으며, 이는 표 2와 같다[6]. 배전계통의 모든 부하점은 동일한 부하를 가지는 것으로 가정하였다.

표 2. 배전계통 구성요소의 신뢰도 데이터

Table 2. Reliability data for components of distribution system

구분	고장률 (빈도/년)	수리시간 (시간/빈도)	비가용률 (시간/년)
고압 케이블	*0.0077	16	0.122
저압 케이블	*0.0066	11	0.074
변압기	0.0011	5	0.006
AC/DC 컨버터	0.0045	16	0.072
DC/DC 컨버터	0.0048	26	0.125

* : km 당 고장률

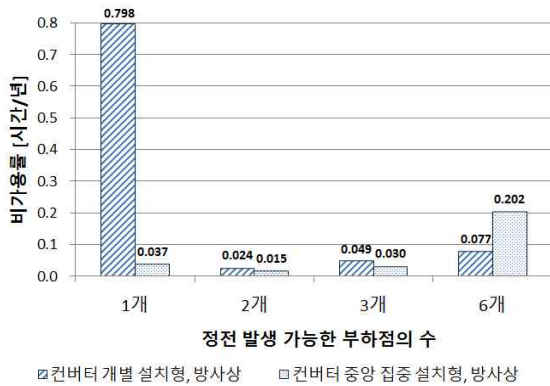


그림 3. DC/DC 컨버터의 배치에 따른 비가용률
Fig. 3. Unavailability according to the arrangement of DC/DC converter

DC/DC 컨버터의 배치에 따른 비가용률 값의 결과는 그림 3과 같다. DC/DC 컨버터가 각 부하점마다 개별적으로 설치되는 컨버터 개별 분산 설치형의 경우에는 정전을 경험하는 부하의 수가 1개일 때 가장 높은 비가용률 값을 나타냈다. 반면에 전원 측에 대용량의 DC/DC 컨버터가 설치되는 컨버터 중앙 집중 설치형의 경우에는 정전을 경험하는 부하의 수가 6개일 때 가장 높은 비가용률 값을 나타냈다. 컨버터 개별 분산 설치형 방식에서는 개별 부하가 정전될 확률이 높지만, 컨버터 중앙 집중 설치형 방식에서는 부하 전체가 정전될 확률이 높아지는 것으로 나타났다.

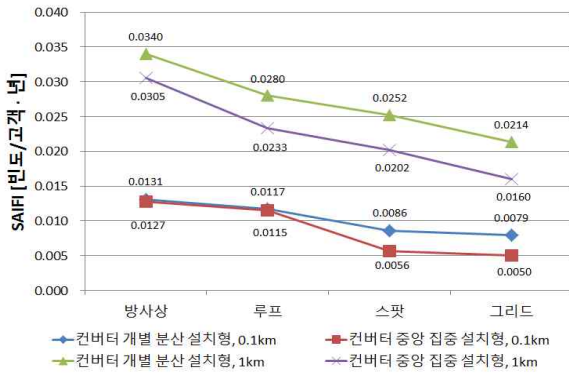
3.3 배전계통의 구성 형태에 따른 신뢰도

본 절에서는 저압직류 배전계통의 구성 형태에 따른 공급신뢰도 평가를 수행하였다. 배전계통의 신뢰도 평가를 위해 DC/DC 컨버터의 배치 및 배전계통의 구성 형태에 따라 분류하고, 부하점 간의 거리를 0.1km, 1km인 두 가지 경우를 추가적으로 고려하여 총 16가지의 경우에서 저압직류 배전계통의 신뢰도 지수를 계산하였고, 결과는 그림 4와 같다.

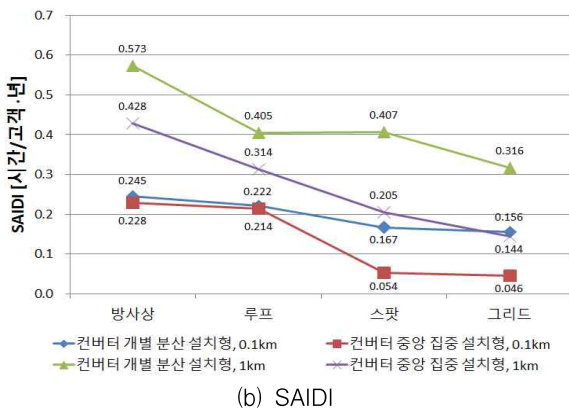
먼저 DC/DC 컨버터의 배치에 따른 신뢰도 지수를 비교하면, 부하점 간의 거리가 0.1km인 방사상 및 루프 형태의 경우에 DC/DC 컨버터의 배치에 따른 신뢰도 지수 값의 큰 차이는 없었다. 이를 제외한 다른 경우에는 개별 설치형 방식에 비교하여 중앙 집중 설치형 방식의 SAIFI는 약 10% 정도, SAIDI 및 ENS는 약 30% 정도로 비교적 크게 감소하였다. 특히 컨버터 중앙 집중 설치형 방식을 적용한 스팟 및 그리드 네트워크 형태에서는 컨버터가 이중화되어 개별 설치형 방식의 동일 형태에 비해 신뢰도 특성이 크게 향상되므로, 부하 밀집 지역이나 높은 신뢰도가 필요한 지역에 적용하는 것이 유리하다.

계통의 구성 형태에 따른 신뢰도 지수를 비교하면, 대체적으로 그리드 네트워크, 스팟 네트워크, 루프, 방사상 형태의 순서로 높은 신뢰도 특성을 나타냈다. 특히 방사상 형태는 이중화되는 구성요소가 없기 때문에 가장 낮은 신뢰도 특성을 나타내며, 그리드 네트워크 형태는 이중화되는 구성요소가 많기 때문에 가장 높은 신뢰도 특성을 나타냈다. 또한 스팟 네트워크 형태에서는 컨버터가 이중화되고, 루프 형태에서는 케이블이 이중화되기 때문에 방사상 형태와 비교하여 보다 높은 신뢰도 특성을 나타냈다.

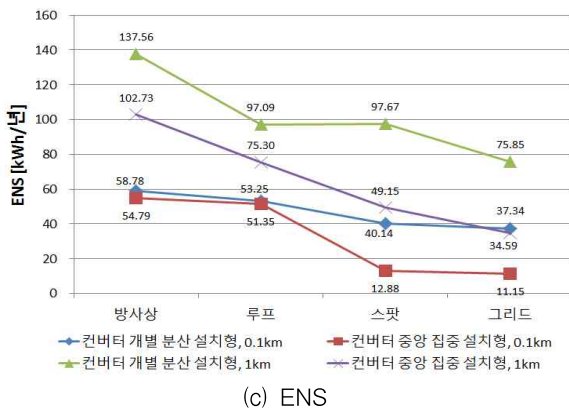
마지막으로 부하점간의 길이에 따른 신뢰도 지수를 비교하면, 부하점간의 길이가 길어질수록 케이블의 고장률이 높아지는 특성으로 인해 신뢰도가 낮게 나타났다. 특히 루프 형태에서는 부하점간의 거리가 긴 경우, 즉 부하밀도가 낮은 지역에서 신뢰도가 향상되는 정도가 크게 나타났다. 하지만, 부하점간의 거리가 짧은 경우, 즉 부하밀도가 큰 지역에서 방사상에 비해 신



(a) SAIFI



(b) SAIDI



(c) ENS

그림 4. DC/DC 컨버터의 배치와 배전계통의 구성 형태에 따른 신뢰도 지수

Fig. 4. The reliability indices according to the arrangement of DC/DC converter and layout of distribution system

신뢰도가 크게 향상되지 않았다. 이는 루프 형태에서 케이블이 이중화되기 때문에 부하점간의 거리에 따라서

신뢰도가 향상되는 수준이 다르게 나타났다. 이러한 특성을 고려하면 부하점간의 거리가 짧은 부하밀도가 높은 지역에서는 네트워크 형태를 적용하는 것이 유리하며, 부하점간의 거리가 긴 부하밀도가 낮은 지역에서는 루프 형태를 적용하는 것이 유리할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 저압직류 배전계통의 컨버터의 배치와 구성 형태에 따른 신뢰도를 평가하였다. 기존의 교류 배전계통에 고장률이 비교적 높은 컨버터를 추가하여 저압직류 배전계통을 구성하였고, DC/DC 컨버터의 배치, 계통의 구성 형태, 그리고 부하점간의 거리를 고려하였다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) DC/DC 컨버터의 배치를 고려하는 경우에는 중앙 집중 설치형 방식에서는 전체 부하가 연간 정전을 경험하는 시간을 나타내는 비가용률 값이 높아지는 것으로 나타났다. 하지만 스팟 및 그리드 네트워크 형태에서 컨버터 중앙 집중 설치형 방식을 적용하면 DC/DC 컨버터가 신뢰도 측면에서 이중화되기 때문에 신뢰도 특성이 크게 향상되므로, 이를 부하 밀집 지역이나 높은 신뢰도가 필요한 지역에 적용하는 것이 효과적이다.
- 2) 배전계통의 구성형태를 고려하는 경우에는 대체적으로 그리드 네트워크, 스팟 네트워크, 루프, 방사상 형태의 순서로 높은 신뢰도 특성을 보였다. 특히 그리드 네트워크 형태는 이중화되는 구성요소가 많기 때문에 가장 높은 신뢰도 특성을 나타냈다. 또한 스팟 네트워크 형태에서는 신뢰도 측면에서 컨버터가 이중화되고, 루프 형태에서는 케이블이 이중화되기 때문에 방사상 형태와 비교하여 보다 높은 신뢰도 특성을 나타냈다.
- 3) 부하점간의 길이에 따른 신뢰도 지수를 비교하면, 부하점간의 길이가 길어질수록 케이블의 고장률이 높아지는 특성으로 인해 신뢰도가 낮게 나타났다. 특히 루프 형태에서 케이블 구성요소가 이중화되기 때문에 부하점간의 거리, 즉 부하 밀도에 따라서 신뢰도가 향상되는 수준이 다르게 나타나므로 이에 대한 고려가 필요하다.

저압직류 배전계통을 실제 배전계통에 도입하기 위해서는 우선 전력품질, 경제성, 보호방식 등의 검토가 선행되어야 한다. 또한 배전계통의 공급신뢰도를 포함하는 다양한 측면에서의 검토가 필요할 것이다.

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

References

- [1] ALLee G. F., Tschudi W., "Edison redux: 380 Vdc brings reliability and efficiency to sustainable data centers", Power and Energy Magazine IEEE, vol.10, no.6, pp.50-59, Nov. 2012.
- [2] Navigant Research Report, Direct current distribution networks, 2013.
- [3] P. Salonen, T. Kaipia, P. Nuutinen, P. Peltoniemi, J. Partanen, "An LVDC distribution system concept", in Proc. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE), pp.A3-1 - A3-16, 2008.
- [4] J. Lassila, T. Kaipia, J. Haakana, "Potential and strategic role of power electronics in electricity distribution systems", CIGRE 20th International Conference on Electricity Distribution System, Jun. 2009.
- [5] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, New York, 1984.
- [6] Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems, IEEE Std 493, 2007.
- [7] Tomi Hakala, "The utilization potential of LVDC distribution system in the Vattenfall distribution network", Tampere University of Technology, 2011.
- [8] J. J. Burke, Power Distribution Engineering, 1994.
- [9] T. Coyle, R. G. Arno, "Application of the minimal cut set reliability analysis methodology to the gold book standard network", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference IEEE, pp.82-93, May. 2002.

◇ 저자소개 ◇



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



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



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



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



김현수(金顯秀)
1982년 11월 5일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 졸업. 2013년~현재 성균관대 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정.



백인호(白寅湖)
1988년 6월 15일생. 2013년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2013년~현재 동 대학원 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정.



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