에너지 효율분석을 통한 DC 마이크로그리드의 타당성 검토

논 문

60-9-7

A Feasibility Study on DC Microgrids Considering Energy Efficiency

유철희* · 정일엽[†] · 홍성수** · 채우규*** · 김주용[§]

(Cheol-Hee Yu · Il-Yop Chung · Sung-Soo Hong · Wookyu Chae · Juyong Kim)

Abstract - More than 80% of electric loads need DC electricity rather than AC at the moment. If DC power could be supplied directly to the terminal loads, power conversion stages including rectifiers, converters, and power adapters can be reduced or simplified. Therefore, DC microgrids may be able to improve energy efficiency of power distribution systems. In addition, DC microgrids can increase the penetration level of renewable energy resources because many renewable energy resources such as solar photovoltaic(PV) generators, fuel cells, and batteries generate electric power in the form of DC power. The integration of the DC generators to AC electric power systems requires the power conversion circuits that may cause additional energy loss. This paper discusses the capability and feasibility of DC microgrids with regard to energy efficiency analysis through detailed dynamic simulation of DC and AC microgrids. The dynamic simulation models of DC and AC microgrids based on the Microgrid Test System in KEPCO Research Institute are described in detail. Through simulation studies on various conditions, this paper compares the energy efficiency and advantages of DC and AC microgrids.

Key Words : DC microgrids, DC distribution system, Energy efficiency, Photovoltaic, Battery, Converter efficiency

1. 서 론

마이크로그리드(Microgrid)는 여러 대의 분산전원을 이용하여 전력수요가 있는 곳에 전력을 공급하는 소규모 전력시스템으로 정의한다. 마이크로그리드는 신재생에너지 전원, 연료전지 및 가스터빈 등 소규모 분산전원의 특징을 이용하여 전력공급의 효율 및 경제성을 높일 수 있으며 전력시스템에 사고가 발생하여 정상적인 전력공급이 불가능할 때에는 단독운전으로 동작하여 전력공급의 신뢰도를 개선할 수 있다. 또한 전력회사는 마이크로그리드와 전력공급 계약을 맺을 수 있는 것이 기술적으로 가능한데 이를 통해 부하의 크기를 어느 정도 예측할 수 있다는 장점을 가진다. 즉, 마이크로그리드는 신뢰성 있는 전력의 공급과 제어 가능한 전력소비가 결합된 새로운 개념의 전력공급 네트워크라고 정의할 수 있다[1-4].

마이크로그리드의 장점으로는 첫째, 대형 송전선이 닿기 힘든 도서 산간지방이나 저개발 국가와 같이 전력설비가 갖추어져 있지 않은 곳에서 요긴하게 사용될 수 있다는 것이다. 둘째로 소형 신재생에너지 전원을 사용할 수 있다. 소형

신재생에너지 전원은 대형 발전설비에 비해 발전 용량이 작은 단점이 있으나 설치단가가 저렴하며 설치기간이 짧은 장점이 있다.

마이크로그리드는 공급전압의 형태에 따라 교류(AC) 마이크로그리드와 직류(DC) 마이크로그리드로 나눌 수 있다. AC 마이크로그리드는 기존의 배전망과 보호설비를 거의 그대로 사용할 수 있다는 장점을 가진다[1-2]. 반면 교류의 특성상 위상 및 주파수의 동기를 맞추기 위해 각 분산전원의 제어회로가 복잡해지며 변압기, 유도기 등의 돌입전류로 인한 전기품질 문제, 3상 부하의 평형문제 등의 문제점이 존재한다. 이에 최근에는 AC 마이크로그리드의 단점을 해결하기 위한 대안으로 DC 마이크로그리드가 제안되었다 [5-7]. 직류 배전시스템 및 DC 마이크로그리드의 가장 큰 장점은 직류부하에 직접 전력을 공급함으로써 부하의 에너지 효율을 향상할 수 있고 교류/직류변환을 위한 전력변환기기를 없애거나 간단한 회로로 대체함으로써 부하의 회로를 간단하게 할 수 있는 장점이 있다. DC 마이크로그리드는 또한 태양광, 연료전지, 배터리 등 직류로 에너지를 생산하는 신재생에너지전원 및 분산전원의 계통연계 시 에너지 효율 등의 장점을 가진다.

이에 직류 배전 및 DC 마이크로그리드의 에너지 효율분석에 대한 선행연구가 있어 왔다[8-12]. 직류 배전에 가장 앞선 분야는 인터넷 데이터 센터로 서버 및 저장장치 등 대규모 직류부하가 한정된 공간에 집약되기 때문에 직류배전이 큰 장점을 가진다[8]. 대부분의 연구에서 에너지 효율 등의 통계적 자료를 사용하여 DC 마이크로그리드의 타당성 및 정책방향에 대해 제안하고 있다 [9-11]. 특히 아파트 등

[†] 교신저자, 정회원 : 국민대학교 전자공학부 전임강사

E-mail : chung@kookmin.ac.kr

* 정 회 원 : 국민대학교 전자공학부 박사과정

** 정 회 원 : 국민대학교 전자공학부 정교수

*** 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원

§ 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원

접수일자 : 2011년 7월 20일

최종완료 : 2011년 8월 23일

대형주거단지[10] 및 대형건물[11] 등 특정한 형태의 마이크로그리드에 대해 통계적 데이터를 이용하여 에너지 효율분석을 수행하였다. 참고문헌 [12]는 교류 및 직류 배전시스템의 조류계산을 통해 정상상태에서의 에너지 효율분석 결과를 제시하였다.

본 논문에서는 무효전력 특성, 고조파 등의 동적 해석을 바탕으로 정밀한 에너지 효율분석을 수행하고자 MATLAB/Simulink 기반의 소자 레벨의 동적 해석모델을 개발하였다. 전체 마이크로그리드는 전력연구원의 마이크로그리드 실증사이트를 기반으로 설계하였고 태양광 발전 모델, 배터리, 가스터빈 및 AC/DC, DC/DC, DC/AC 전력변환기 등의 상세모델을 구현하였다. 마이크로그리드의 실제 운영과 거의 유사하게 동작하도록 태양광 발전의 경우 최대전력추종알고리즘을 적용하였고 시간대별 일사량에 따라 출력이 변하도록 설계하여 분석의 정확성을 높였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 태양광 발전, 배터리, 가스터빈 등의 분산전원의 상세모델에 대해서 설명하며 3장에서는 마이크로그리드 해석모델 개발에 대해 자세히 설명한다. 4장에서는 다양한 상황을 고려한 에너지 효율분석 결과를 제시하며 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 마이크로그리드 해석모델

2.1 AC 마이크로그리드 해석모델

AC 마이크로그리드를 해석하기 위해 그림 1에 도시한 바와 같은 한국전력 전력연구원(KEPCO Research Institute)의 마이크로그리드 실증사이트를 모델링하였다. 전체 배전계통은 교류로 전력을 공급하고 선간 380V 정격의 2개의 간선(Feeder)으로 구성되며 분산전원과 부하가 방사형으로 연결되어 있다. 분산전원으로는 10kW에서 30kW급 태양광(PV) 전원, 50kWh급 배터리, 그리고 60kW급 마이크로 가스터빈(Micro Gas Turbine)으로 구성된다. 부하는 연구동, 스마트 주택 및 기숙사, 전기자동차 충전설비 및 테스트를 위한 가변부하(Adjustable Load Bank)로 구성된다. 전기 자동차의 경우 30~50kW의 직류부하가 수시로 연결될 수 있다.

그림 1 한전 전력연구원 마이크로그리드 실증사이트 구성도
Fig. 1 Configuration of AC microgrid test-bed installed in KEPCO Research Institute

태양광 전원은 직류전력을 생산하며 배터리 역시 직류로 에너지를 저장하며 일반적으로 DC/DC 부스트 컨버터로 직류전력을 제어한다. 따라서 교류계통과 연계되기 위해서는 DC/AC 변환기를 거친다. 마이크로 가스터빈은 일반적으로 고속으로 회전하기 때문에(300Hz 이상) AC/DC/AC 변환을 거쳐서 교류계통과 연계된다. 연구소 건물부하와 스마트 주택 및 기숙사 부하는 교류부하와 직류부하가 섞여있는 형태로 직류부하의 경우 정류기 또는 AC/DC 컨버터를 통해 전력을 공급받는다.

2.2 DC 마이크로그리드 해석모델

그림 2는 전력연구원의 마이크로그리드 실증단지를 DC 마이크로그리드로 변환한 모델의 단선도이다. 그림 1의 AC 마이크로그리드와 분산전원 및 부하의 구성이 동일하게 설계하였다. AC 마이크로그리드와 달리 22.9kV/380V 변압기 2차 측에 AC/DC 컨버터가 있어 직류 400V의 전압이 부하에 전달된다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 태양광 전원 및 배터리 등의 DC/AC 변환기를 생략할 수 있어 전력변환에 따른 에너지 손실을 저감할 수 있다. 반면 전력회사에서 공급받는 교류전력은 AC/DC 컨버터를 통하여 변환되어야 한다. 부하의 경우 AC 마이크로그리드와 반대로 직류부하는 정류기 없이도 연계가 가능한 반면 교류부하는 DC/AC 전력변환 인버터가 필요하다. 미국 버지니아 공대의 보고서에 의하면 2010년에 총부하의 80%가 전력변환기를 거쳐서 전력을 공급 받는다는 통계가 있고 직류부하의 비율은 앞으로 더욱 늘어날 것으로 예상 된다 [9].

그림 2 DC 마이크로그리드 모델
Fig. 2 Configuration of DC microgrid model

3. 신재생 에너지 및 분산전원 모델

3.1 전력변환기 모델

AC를 DC로(컨버터 동작) 또는 반대로(인버터 동작) 전력을 변환하기 위해서는 전력변환기가 필요하다. 기본적으로 3상 전압원 컨버터는 전압-전류의 4상한 동작이 가능하기 때문에 (전압, 전류 모두 크기, 위상 및 방향의 제어가능) 동일한 회로구성으로 컨버터와 인버터 동작이 가능하다.

이상적인 인버터는 고용량의 전력을 공급할 수 있으면서 출력에 포함된 고조파나 노이즈가 적다. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 등장으로 전압원 인버터의 적용 영역이 확대되었지만 여전히 대용량 부문에서는 출력의 고

조과 저감, 스위칭 손실 등에 문제가 있다. 본 논문에서는 다중레벨 컨버터인 3레벨 컨버터를 적용하였다. 3레벨 컨버터는 같은 정격의 2레벨 컨버터보다 많은 소자들이 직렬로 연결되므로 더 높은 전압에 견딜 수 있어 스위칭 손실을 줄이고 출력의 고조파 성분을 저감할 수 있다.

그림 3 전력변환기 개념도

Fig. 3 Conceptual diagram of power converter

전압원 컨버터의 제어는 d-q 동기회전축 상에서 순시전력을 제어함으로써 가능하다. 계통이 3상평형이고 정상상태이면 동기회전좌표계 상의 d-q 전압, 전류는 일정한 직류성분으로 나타나며 순시유효전력과 무효전력은 d축과 q축으로 분리되어 각각 따로 제어될 수 있다. 이러한 특성은 계통 제어 및 해석에 매우 유용하며 정지좌표계에 비해 높은 정확도를 갖는다. 그림 4는 3레벨 전압원 컨버터의 전체 제어개념도이다. 먼저 측정된 전압, 전류는 필터(anti-aliasing filter)를 거쳐 고조파와 노이즈를 제거하며 단위법(per unit)으로 변환된다. 이렇게 측정된 전압으로부터 위상과 주파수를 얻어 이후의 전압, 전류는 dq 동기회전좌표계에서 제어되며 마지막에 컨버터 출력 기준전압을 다시 abc 정지좌표계로 변환하여 PWM 신호를 생성한다.

그림 4 전압원 컨버터의 제어블록선도

Fig. 4 Control block diagram of voltage source converter

위상측정회로(PLL)는 a상 전압의 위상각과 주파수를 측정하는 회로로서 인버터 제어에 있어 매우 중요한 구성요소이다. 그림 5는 dq 회전좌표계에서 구현된 위상측정회로의 블록선도를 보여준다.

그림 5 위상측정회로의 블록선도

Fig. 5 Control block diagram of phase locked loop (PLL)

컨버터 출력전압과 전류를 회로방정식으로 나타내고 이를 dq 회전좌표계로 변환하면 그림 6과 같은 전류제어회로를 구할 수 있다. 블록선도상의 인덕터 L은 인버터 출력과 계

통과 연계되는 버스 사이의 등가임피던스를 의미한다. d와 q축의 기준전류와 컨버터 출력전류를 비교하여 그 오차로부터 컨버터 기준출력전압을 생성한다.

그림 6 전류제어기의 블록선도

Fig. 6 Control block diagram of current controller

그림 7은 Simulink에 구현한 3레벨 PWM 전압원 컨버터 모델이다. DC 마이크로그리드에서는 교류계통에서 전압을 받아서 400V 직류전압을 출력 제어용 전력변환기 및 마이크로그리드 곳곳의 교류/직류 또는 직류/교류 전력변환기로 사용하였다. PWM의 선형영역에서 제어하기 위해서는 변조율(modulation index)을 1보다 작은 범위에서 제어해야 하며 교류 선간전압의 크기를 직류 축의 절반으로 변압하면 변조율을 0.8로 유지할 수 있다.

개발된 PWM 전압원 컨버터 모델의 출력 전력에 따른 에너지 효율 곡선을 그림 8에 나타내었다. 컨버터의 손실은 전도손실(conduction loss)과 스위칭손실(switching loss)로 나눌 수 있다. 출력이 작을 때는 스위칭 손실이 상대적으로 크기 때문에 효율이 낮다. 본 논문에서는 컨버터의 정격출력에서 약 96~97%로 유지되도록 컨버터 손실을 설계하였다. 이는 참고문헌 [8]에서 제공하는 적력변환기의 에너지 효율 데이터와 거의 유사하다.

그림 7 3레벨 PWM 전압원 컨버터 해석모델

Fig. 7 3-level PWM voltage-source converter model

그림 8 PWM 전압원 컨버터의 에너지 효율 측정결과

Fig. 8 Energy efficiency simulation result of PWM voltage source converter depending on output power level

3.2 태양광 발전기 모델

태양광 발전(PV, photovoltaics)은 pn 접합된 반도체에 광 에너지를 가하면 전기가 발생하는 광전효과를 이용한다. 태양전지에 태양광이 입사되면 광 에너지에 의해 전자, 정공쌍이 분리되고 전자와 정공이 이동하여 양쪽의 전극을 각각 음극과 양극으로 대전시킴으로써 기전력이 발생하여 외부에 연결된 부하에 전류가 흐른다. 그림 9는 PV 모듈의 등가회로를 나타낸 것이다. 여기서, 전류원 I_{ph} 는 광 기전류로 표현되며 R_{sh} 와 R_s 는 각각 PV 모듈의 병렬 등가저항과 직렬 등가저항이다.

그림 9 PV 모듈의 등가회로

Fig. 9 Equivalent circuit of PV module

R_s 는 태양전지의 에미터, 베이스의 저항 및 전극의 접촉 성분에 의해 발생하며 비교적 작은 값이다. R_{sh} 는 태양전지의 제조과정 중의 결함에 의해 발생하며 누설전류를 야기한다. 일반적으로 R_{sh} 는 수백 $M\Omega$ 단위로 등가회로에서는 개방회로로 둘 수 있다. PV 모듈 여러 개를 직-병렬로 연결한 것을 PV 어레이(array)라고 부르며 부하에 흐르는 전류 I_L 는 다음과 같이 표현할 수 있다 [13-14].

$$I_L = N_p \left[I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q}{kTA} \frac{V_o + R_s I_L}{N_s} \right) - 1 \right) \right] \quad (1)$$

이때 N_s 는 직렬 연결된 셀의 수, N_p 는 병렬 연결된 모듈의 수, q 는 전하량, k 는 볼츠만상수, A 는 pn접합 이상 계수, I_s 는 셀의 역포화 전류이다.

이상의 PV 어레이 모델을 이용하여 3.3kW급 Simulink 모델의 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 4개의 병렬 PV 모듈과 540개의 직렬 셀을 연결하였고 일사량은 50, 80, 100mW/cm² 임을 가정하였다. 그림 10(a)는 PV 어레이의 전압-전류 특성이며 (b)는 전력-전압 특성이다.

그림 10 일사량에 따른 PV 어레이 특성(좌: 전압-전류 특성 곡선, 우: 전압-전력 특성곡선)

Fig. 10 PV array characteristics (Left: V-I characteristics, Right: P-V characteristics)

PV 어레이의 전력-전압 곡선에서 전압에 따라서 전력이 상승했다가 감소하게 되는데 최대전력점(Maximum Power Point)에서 PV 어레이의 출력을 제어하는 것이 중요하다. 외부의 조건(일사량, 온도)으로 인하여 최대 전력점이 변해도 태양광 인버터가 항상 태양전지 어레이의 최대출력을 얻어지도록 하는 것을 최대전력 추종제어(MPPT, Maximum Power Point Tracking)라고 한다.

본 논문에서 적용한 MPPT 알고리즘은 P&O 기법으로 그림 11의 순서도와 같이 동작하는데 전압과 전류의 곱으로 전력 값을 계산하고 이전의 전력과 현재의 전력을 비교하여 현재 전력이 더 크고 전압도 더 크다면 전압지령치에 일정한 스텝(c)값을 더해주고 전압이 작다면 스텝만큼 빼준다. 반대로 현재보다 이전의 전력이 더 크고 현재 전압이 더 클 경우엔 스텝을 빼주고 반대인 경우는 스텝만큼 더해준다.

P&O 알고리즘은 최대전력점 근방에서 스텝만큼의 변동을 가지고 미세하게 진동하는 단점이 있으나 알고리즘이 단순하고 일사량의 급격한 변동에도 무리 없이 동작하기 때문에 본 논문의 목적에 부합하는 방법이다. 간단한 피드백 구조를 갖고 있으며 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다.

그림 11 P&O MPPT 알고리즘

Fig. 11 P&O MPPT algorithm for PV Generation

그림 12는 PV 어레이를 마이크로그리드에 연계하기 위해 사용하는 부스트 컨버터(boost converter)의 회로도를 보여주며 그림 13은 부스트 컨버터의 제어블록선도이다. PV 어레이의 전압과 전류를 측정하여 MPPT를 수행한 후 전압명령을 얻고 이 명령과 실제 전압을 비교하여 PI 제어기를 지나 전류명령을 생성한다. 전류제어명령은 부스트 컨버터의 스위칭 동작을 통하여 PV 어레이를 최대 전력점에서 동작할 수 있게 제어한다.

본 논문에서는 2개의 30kW, 1개의 10kW PV 발전기를 모델링하였다. 30kW 정격의 PV 어레이는 최대전력 동작점인 (250V, 123A)부근에서 동작하며 이때의 PV 출력 전력은 30.26kW로 최대전력점에서 동작하게 된다. PV의 계통연계를 위한 부스트 컨버터 전력변환기(PCS)의 전력변환효율은 약 96-97%가 되도록 회로를 설계하였다.

그림 12 Boost Converter를 이용한 PV 어레이의 계통연계
Fig. 12 Boost converter integrating PV array to electric power system

그림 13 PV 연계를 위한 Boost Converter의 제어원리
Fig. 13 Control block diagram of boost converter integrating PV array to electric power system

3.3 배터리 및 충방전 시스템 모델

그림 14는 납축전지 배터리 셀(battery cell)이 가지는 충전특성 및 방전특성을 나타낸 것이다. 충전특성의 경우 셀 전압이 약 4.2V까지 정전류로 충전되는 특성을 가지는 것을 확인할 수 있고, 4.2V에 도달한 이후에는 정전압 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 배터리 방전의 경우에도 4.2V에서 방전을 시작하여 약 3.4V까지 일정하게 전압이 하강하며 그 이후에는 급속하게 전압이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 배터리 수명을 고려하였을 때 충전은 정전류 및 정전압 기능을 가지는 양방향 컨버터 알고리즘이 사용되고 방전의 경우에는 일정 전압 이하로 방전될 경우 배터리 수명에 안 좋은 영향을 미칠 수 있으므로 방전 전압 여유를 가지고 구동되어야 한다.

그림 14 납축전지 충전 특성(위) 및 방전 특성(아래)
Fig. 14 Lead-Acid battery charging (top) and discharging (bottom) characteristics

그림 15 배터리를 충전하기 위한 양방향 컨버터

3.4 마이크로 가스터빈 모델

마이크로 가스터빈은 교류발전기로 고속회전을 하기 때문에 교류계통에 연계되는 직류계통에 연계되는 전력변환기를 거쳐야 한다. 그림 16에 마이크로터빈의 계통연계 모델을 도시하였다. 마이크로 가스터빈은 전력변환기를 통해 마이

크로그리드에 연계되므로 주파수 드롭(frequency droop) 제어 등 다른 발전기와와의 협조 제어가 필요 없고 정속으로 제어하며 AVR(automatic voltage regulator)을 이용하여 고정자 측의 전압을 일정하게 하는 제어를 수행한다. 마이크로 가스터빈으로부터 마이크로그리드로의 출력은 계통연계 전력변환기를 통해서 제어한다. 이때 계통연계 전력변환기에서 출력을 증가하면 교류 측 전압이 강하하게 되는데 교류 전압을 일정하게 유지하기 위해서 마이크로 가스터빈에서 출력을 증가시키므로 결과적으로 마이크로 가스터빈의 출력을 제어할 수 있다. 즉 마이크로 가스터빈은 부하추종(load following) 제어를 수행하며 전력변환기를 포함한 전체 시스템은 출력전류(출력전력)를 제어한다.

마이크로 가스터빈은 동기기(Synchronous Machine) 모델을 이용하였고 조속기 및 AVR 제어로 정속 및 정전압제어를 수행한다. 마이크로 가스터빈의 출력주파수는 전력시스템 주파수보다 빠르게 AC/DC 컨버터를 통해서 직류로 변환한 후 마이크로그리드에 연계된다.

그림 16 마이크로 가스터빈의 DC 마이크로그리드 연계
Fig. 16 Configuration of dc microgrid integration of micro-gas turbine

4. 시뮬레이션을 통한 에너지효율 분석

앞서 구축한 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드 모델을 이용하여 에너지 효율비교 및 분석을 하고자 한다. 에너지 효율 비교에 사용된 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드 전체 구성도는 그림 17, 18과 같다. 각 세부 요소는 앞 장에서 설명한 모델을 적용하였다. Zone A, Zone B에 존재하는 N-1 부하 및 스마트 홈 부하는 직류전원이 필요한 직류부하와 교류부하의 혼합모델로 구성하였다. 따라서 AC 마이크로그리드의 부하에는 AC/DC 컨버터가, DC 마이크로그리드의 부하에는 DC/AC 컨버터가 존재하게 된다. 직류부하의 경우 DC 마이크로그리드에 연계되면 전력변환기를 거치지 않고 전력을 공급받을 수 있으며 AC 마이크로그리드에 연계되면 AC/DC 컨버터를 통해 전력을 공급받는다. 교류부하의 경우는 AC 마이크로그리드에 연계될 때 전력변환 없이 바로 전력을 공급받으며 DC 마이크로그리드에 연계될 때는 DC/AC 인버터를 통해 전력을 공급받는다. 따라서 에너지 효율을 분석할 때 교류부하와 직류부하의 비율이 매우 중요할 것으로 보인다.

효율비교는 총 2가지 case에 대하여 비교하였으며 case 1의 경우에는 DC 부하와 AC 부하의 비율이 50:50일 때, case 2의 경우에는 DC 부하의 비율이 100%일 때로 설정하였다.

그림 17 에너지 효율분석에 사용된 AC microgrid 모델
Fig. 17 AC microgrid used for energy efficiency analysis

그림 18 에너지 효율분석에 사용된 DC microgrid 모델
Fig. 18 DC microgrid used for energy efficiency analysis

표 1 전력전송선로 데이터

Table 1 Distribution line data

구분	길장(m)	R(Ω/km)	X(Ω/km)
STS-ACB1	10	0.0996	0.0890
STS-ACB2	10	0.0996	0.0890
저압모선-PV1	10	1.7100	0.0994
저압모선-PV2	10	3.0100	0.1040
저압모선-PV3	230	0.6270	0.0925
저압모선-Battery	10	0.4760	0.0941
저압모선-MGT	230	0.4760	0.0941
저압모선-Load bank1	50	0.4760	0.0941
저압모선-Load bank2	50	0.4760	0.0941
저압모선-Smart Home	50	0.3970	0.0922
저압모선-EV	70	0.1920	0.0911
저압모선-N1시험동	30~120	0.4760	0.0941

또한 각 전력변환단의 효율은 96~97%로 하였고 분산전원의 경우 최대의 전력을 발전하고 있는 것으로 가정하였다. 전력전자기술의 발전으로 인해 배전레벨에서의 전력변환기의 효율이 97%에 이르는 것으로 알려져 있다. 전력변환기술은 AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC 등 다양한 전력변환

기술이 고르게 발전되고 있으므로 참고문헌 [9]번과 같이 갑자기 DC 마이크로그리드가 AC 마이크로그리드에 비해 전력변환 효율이 일괄적으로 20% 개선된다는 주장은 공정한 판단의 기준이 될 수 없다. 이에 비해 참고문헌 [8]을 통해 DC와 AC의 전력변환 효율이 기술개발의 선후관계에 따라 1% 내외에서 차이가 난다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구보고서에서는 DC와 AC 모두 전력변환의 효율이 96~97% 근방이 되도록 전력변환기를 모델링 하였다.

4.1 Case 1: DC부하 vs AC 부하 (50:50)

Case 1에서는 DC 부하와 AC 부하의 구성비가 50:50인 경우의 에너지 효율을 검토하였다. Zone A는 부하(200kW)에 대해 작은 분산전원(PV1 30kW, PV2 10kW)이 연계된 계통이며 Zone B는 부하(150kW)의 많은 전력이 분산전원(총 140kW)에서 공급을 받는 구조이다.

Case 1에 대한 DC 및 AC 마이크로그리드의 각 Zone별 발전, 소비 전력, 전력손실, 및 에너지 효율, 그리고 전체 에너지 효율을 표 2에 나타내었다. 전력손실은 선로 및 전력변환기에서 발생하며 표 3에서 5에 나타내었다.

DC 마이크로그리드의 경우 선로손실(C2)이 Zone A에서는 3.90kW, Zone B에서는 8.44kW가 발생하였으며 AC 마이크로그리드의 경우 Zone A에서는 2.40kW, Zone B에서는 4.95kW가 발생하였다. 즉 DC 마이크로그리드의 선로손실이 총 12.343kW, AC 마이크로그리드의 선로손실이 총 7.35kW로 DC 마이크로그리드의 선로손실이 큼을 확인할 수 있다. 그 이유는 AC 마이크로그리드의 경우 같은 전력을 전송함에 있어 3개의 배전선로를 통하므로 각 상은 전체 전력의 1/3을 공급하지만 DC 마이크로그리드의 경우 2개의 배전선로를 이용하므로 각 선로에서 전체 전력의 1/2에 해당하는 전력을 공급한다. 따라서 배전선로 당 흐르는 전류의 크기가 DC 마이크로그리드가 더 크기 때문에 선로손실 ($(\text{전류})^2 \times \text{저항}$)이 더 큼을 알 수 있다. 즉 DC 마이크로그리드는 AC 마이크로그리드에 비해 배전선로의 개수를 줄임으로써 설비투자를 줄일 수 있는 장점이 있으나 선로손실이 증가하므로 운영비가 증가하는 단점이 있다.

시뮬레이션을 통해 얻은 전력변환손실은 DC의 경우 Zone A에서 10.81kW, Zone B에서 9.39kW가 소실되며 AC의 경우는 Zone A에서 7.47kW, Zone B에서 13.23kW의 전력이 소실된다. 따라서 총 전력변환손실은 DC 마이크로그리드의 경우 20.20kW, AC 마이크로그리드의 경우 20.7kW로 소모된다. kW 단위 이하의 차이는 전력변환기의 효율을 96%로 설정하였지만 동적시뮬레이션의 특성상 1% 이내에서 발생하는 오차 때문에 발생한다고 볼 수 있으므로 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드의 전력변환손실은 거의 같다고 할 수 있다. 이는 AC부하와 DC부하의 구성비가 50:50이기 때문으로 AC 마이크로그리드에서는 DC 부하를 이용할 때 전력변환손실이 DC 마이크로그리드에서는 AC 부하를 이용할 때 전력변환손실이 발생하는데 그 크기가 각각 50%로 같기 때문이다. 만약 AC 부하와 DC 부하의 구성비가 50%가 아니라 서로 다를 경우에는 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드의 전력변환손실이 다를 것이다.

이상에서 살펴본 전력손실에 의해 DC 마이크로그리드의 에너지 효율은 Zone A에서 93.05%, Zone B에서 89.07%, 그

리고 DC 마이크로그리드 전체 에너지 효율은 91.32%로 나타났다. 효율 계산은 부하 총 소비 전력(B)를 전력계통 및 분산전원의 총 공급 전력(A)으로 나눈 값에 100을 곱하여 구하였다. 즉 총 공급전력과 총 소비전력의 차이(A-B)가 전력 변환 및 선로에서의 손실(C+D)와 같게 된다. 반면 AC 마이크로그리드는 Zone A에서 95.30%, Zone B에서 88.89%, 그리고 AC 마이크로그리드 전체에서 92.49%로 관찰되었다. 즉 AC부하와 DC부하가 50:50인 경우 AC 마이크로그리드의 에너지 효율이 조금 더 좋음을 알 수 있다. 이는 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드 모두 전력변환손실이 거의 같은데 반해 선로손실에서 DC 마이크로그리드가 크게 나타나기 때문이다.

Zone 별로 살펴보면 Zone A보다는 Zone B에서 DC 마이크로그리드의 에너지 효율이 상대적으로 개선됨을 볼 수 있다. Zone B는 태양광, 배터리, 마이크로터빈 등 다수의 DC 전원이 있으며 부하 150kW의 대부분을 DC 전원에서 공급하기 때문에 전력변환손실이 적게 발생한다. 반면에 AC 마이크로그리드에서의 DC 전원에서 DC 부하에 전력을 공급하기 위해서는 DC/AC 인버터와 AC/DC 컨버터가 필요하다. 즉, 최소 2단계 이상의 전력변환이 더 필요하기 때문에 AC 마이크로그리드에서 DC 전원과 DC 부하 사이의 전력 전송 시에 에너지 효율이 낮아진다. 따라서 가능한 많은 DC 부하가 존재하며 부하의 많은 부분을 DC 전원에서 공급하는 구조에서 DC 마이크로그리드가 효과가 있다. 이러한 해석은 다음 Case 2의 결과를 보면 더욱 자명해 진다.

표 2 DC 및 AC 마이크로그리드의 효율 데이터 (Case 1)
Table 2 Energy efficiency of DC and AC microgrid (Case 1)

항 목	단위	DC microgrid		AC microgrid	
		Zone A	Zone B	Zone A	Zone B
총공급전력 (A=A1+A2)	kW	211.71	163.17	210.01	163.65
계통 공급전력(A1)	kW	171.40	19.99	169.70	20.65
분산전원 공급전력(A2)	kW	40.31	143.18	40.31	143.00
부하총소비전력(B)	kW	197.00	145.34	200.14	145.47
전체총손실 (C=C1+C2)	kW	14.71	17.83	9.87	18.18
전력변환손실(C1)	kW	10.81	9.39	7.47	13.23
전송손실(C2)	kW	3.90	8.44	2.40	4.95
효율(B/A*100)	%	93.05	89.07	95.30	88.89
Zone A, B 전체 효율	%	91.32		92.49	

표 3 DC 마이크로그리드의 전력변환손실 (Case 1)

Table 3 Energy conversion loss of DC microgrid (Case 1)

Zone	전력변환단	Pin [kW]	Pout [kW]	loss [kW]	효율 [%]
A	AC/DC_A	171.40	165.50	5.90	96.56
	PV1_DC/DC	30.27	29.25	1.02	96.63
	PV2_DC/DC	10.04	9.65	0.39	96.09
	N-1 DC/AC	103.60	100.10	3.50	96.62
B	AC/DC_B	19.99	19.31	0.68	96.60
	PV3_DC/DC	30.27	29.30	0.97	96.80
	BAT_DC/DC	49.99	47.96	2.03	95.94
	MGT_DC/AC	62.92	60.42	2.50	96.03
	SH_DC/AC	78.47	75.26	3.21	95.91

표 4 AC 마이크로그리드의 전력변환손실 (Case 1)**Table 4** Energy conversion loss of AC microgrid (Case 1)

Zone	전력변환단	Pin [kW]	Pout [kW]	loss [kW]	효율 [%]
A	PV1_AC/DC	29.20	28.25	0.95	96.75
	PV1_DC/DC	30.27	29.28	0.99	96.74
	PV2_AC/DC	9.60	9.30	0.30	96.93
	PV2_DC/DC	10.05	9.76	0.29	97.15
	N-1_AC/DC	104.95	100.00	4.95	95.28
B	PV3_AC/DC	29.29	28.34	0.95	96.76
	PV3_DC/DC	30.27	29.29	0.98	96.76
	BAT_AC/DC	47.95	46.42	1.53	96.81
	BAT_DC/DC	49.99	47.95	2.04	95.92
	MGT_AC/DC	60.48	58.70	1.78	97.06
	MGT_DC/AC	62.74	60.48	2.26	96.40
	SH_AC/DC	78.70	75.01	3.69	95.31

표 5 DC 및 AC 마이크로그리드의 전송손실 (Case 1)**Table 5** Line loss of DC and AC microgrid (Case 1)

Zone	전송선로	DC 마이크로그리드 전송손실 [W]	AC 마이크로그리드 전송손실 [W]
A	STS	206.10	209.3
	PV1	179.40	116.6
	PV2	34.72	62.07
	N-1	3481.00	2,013.00
B	STS	4.44	31.515
	PV3	1393.00	911.2
	BAT	134.50	80.51
	MGT	4931.00	2,522.00
	SH	1982.00	1,401.00

4.2 Case 2: DC부하 vs AC 부하 (100:0)

Case 2에서는 DC 부하와 AC 부하의 구성비가 100%:0% 인 경우의 에너지 효율을 검토하였다. 각 Zone의 발전, 소비 전력, 전력손실, 및 에너지 효율, 그리고 전체 에너지 효율을 표 6에 나타내었다. 전력손실은 선로 및 전력변환기에서 발생하므로 해당 손실을 역시 표 7에서 9에 나타내었다.

DC 마이크로그리드의 경우 선로손실이 Zone A에서는 4.27kW, Zone B에서는 8.68kW가 발생하였으며 AC 마이크로그리드의 경우 Zone A에서는 2.86kW, Zone B에서는 4.77kW가 발생하였다. 즉 DC 마이크로그리드의 선로손실이 총 12.95kW, AC 마이크로그리드의 선로손실이 총 7.63kW로 Case 1의 경우와 동일하게 DC 마이크로그리드의 선로손실이 큼을 확인할 수 있다.

시뮬레이션을 통해 얻은 전력변환손실은 DC의 경우 Zone A에서 7.41kW, Zone B에서 6.31kW가 소실되며 AC의 경우는 Zone A에서 10.94kW, Zone B에서 15.38kW의 전력이 소실된다. 따라서 총 전력변환손실은 DC 마이크로그리드의 경우 13.72kW, AC 마이크로그리드의 경우 26.32kW로 소모되어 DC 마이크로그리드의 전력변환 손실이 AC 마이크로그리드에 비해 크게 줄어들었다. 이는 DC부하와 AC부하의 구성이 100:0이기 때문에 AC 마이크로그리드에서는 DC 부하를 이용할 때 전력변환손실이 발생하지만, DC 마이크로그리드에서는 DC 부하를 사용할 때에는 전력변환 손실이 발생하지 않기 때문이다.

이상에서 살펴본 전력손실에 의해 DC 마이크로그리드의 에너지 효율은 Zone A에서 94.32%, Zone B에서 91.06%, 전체 에너지 효율은 92.86%로 관찰되었다. 반면 AC 마이크로그리드는 Zone A에서 93.55%, Zone B에서 88.23%, 그리고 전체에서 91.19%로 관찰되었다. 즉 DC부하와 AC부하가 100:0인 경우 DC 마이크로그리드의 에너지 효율이 더 좋을 수 있다. 또한 DC 마이크로그리드는 적은 선로손실, 많은 DC 부하의 존재 여부, 그 많은 DC 부하가 요구하는 전력을 충당할 수 있는 DC 전원들의 존재에 따라서 에너지 효율을 높일 수 있다.

표 6 DC 및 AC 마이크로그리드의 효율 데이터 (Case 2)**Table 6** Energy efficiency of DC and AC microgrid (Case 6)

항 목	단위	DC microgrid		AC microgrid	
		Zone A	Zone B	Zone A	Zone B
총공급전력 (A=A1+A2)	kW	205.82	167.69	214.01	171.25
계통 공급전력(A1)	kW	165.50	24.55	173.70	28.09
분산전원 공급전력(A2)	kW	40.32	143.14	40.31	143.16
부하총소비전력(B)	kW	194.14	152.70	200.21	151.10
전체총손실 (C=C1+C2)	kW	11.68	14.99	13.80	20.15
전력변환손실(C1)	kW	7.41	6.31	10.94	15.38
전송손실(C2)	kW	4.27	8.68	2.86	4.77
효율(B/A*100)	%	94.32	91.06	93.55	88.23
Zone A, B 전체 효율	%	92.86		91.19	

표 7 DC 마이크로그리드의 전력변환손실 (Case 2)**Table 7** Energy conversion loss of DC microgrid (Case 2)

Zone	전력변환단	Pin [kW]	Pout [kW]	loss [kW]	효율 [%]
A	AC/DC_A	165.50	159.50	6.00	96.37
	PV1_DC/DC	30.27	29.25	1.02	96.63
	PV2_DC/DC	10.05	9.66	0.39	96.11
	N-1 DC/AC	-	-	-	동작안함
B	AC/DC_B	24.55	23.62	0.93	96.21
	PV3_DC/DC	30.27	29.27	1.00	96.70
	BAT_DC/DC	49.99	48.04	1.95	96.10
	MGT_DC/AC	62.88	60.45	2.43	96.13
	SH_DC/AC	-	-	-	동작안함

표 8 AC 마이크로그리드의 전력변환손실 (Case 2)**Table 8** Energy conversion loss of AC microgrid (Case 2)

Zone	전력변환단	Pin [kW]	Pout [kW]	loss [kW]	효율 [%]
A	PV1_AC/DC	29.29	28.33	0.96	96.72
	PV1_DC/DC	30.27	29.29	0.98	96.76
	PV2_AC/DC	9.62	9.23	0.39	95.95
	PV2_DC/DC	10.04	9.62	0.42	95.80
	N-1_AC/DC	208.40	200.21	8.19	96.07
B	PV3_AC/DC	29.29	28.34	0.95	96.76
	PV3_DC/DC	30.27	29.29	0.98	96.76
	BAT_AC/DC	47.98	46.38	1.60	96.67
	BAT_DC/DC	49.99	47.98	2.01	95.98
	MGT_AC/DC	60.37	58.26	2.11	96.50
	MGT_DC/AC	62.90	60.37	2.53	95.98
	SH_AC/DC	156.30	151.10	5.20	96.67

표 9 DC 및 AC 마이크로그리드의 전송손실 (Case 2)

Table 9 Line loss of DC and AC microgrid (Case 2)

Zone	전송선로	DC 마이크로그리드 전송손실[W]	AC 마이크로그리드 전송손실[W]
A	STS	192.2	258
	PV1	180.8	124.1
	PV2	35.7	63.54
	N-1	3,861.00	2,411.00
B	STS	9.196	22.91
	PV3	1,391.00	933.1
	BAT	134.3	85.4
	MGT	4,912.00	2,462.00
	SH	2,235.00	1,268.00

6. 결 론

이상에서 DC 마이크로그리드의 타당성 검토를 위해 DC 마이크로그리드와 AC 마이크로그리드의 Simulink 기반의 동적모델을 이용하여 에너지 효율을 비교하여 보았다. 마이크로그리드의 에너지 효율은 변압기손실, 선로손실, 전력 변환손실과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

첫째, AC 마이크로그리드에 비해 DC 마이크로그리드의 경우, 선로손실이 증가함을 관찰할 수 있었다. 이는 AC 마이크로그리드의 경우 3상의 배전선로를 이용하여 전력을 전송하는데 반해 DC 마이크로그리드는 2개의 선로를 이용하여 같은 크기의 전력을 전송하기 때문에 각 선로에 흐르는 전류의 크기 및 선로의 손실이 증가한다. 따라서 DC 마이크로그리드의 설계 시에는 저항이 작은 배전선로를 사용한다든지 배전 전압레벨을 높여서 전류의 크기를 줄이는 등의 노력이 필요하다.

둘째, 전력변환의 효율을 AC 마이크로그리드와 DC 마이크로그리드 모두 96~97% 근방에서 설계를 하였을 때 전력 변환의 효율의 차이는 발전이 AC인지 DC인지, 부하가 AC인지 DC인지 등에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 즉 마이크로그리드에 AC 부하가 많은 경우에는 AC 마이크로그리드를 이용하고 AC 전원에서 전력을 공급받는 것이 에너지 효율 측면에서 이득일 것이다. 왜냐하면 DC 전원에서 AC 부하에 전력을 공급하기 위해서는 DC/AC 전력변환이 최소한 단계이상 필요하기 때문이다. 반대로 DC 부하가 많은 경우에는 DC 마이크로그리드를 이용하여 DC 전원(태양광, 연료전지, 배터리) 혹은 비동기 주파수로 회전하는 AC 전원(풍력, 마이크로터빈)으로부터 전력을 공급받는 것이 유리하다. 그 이유는 마찬가지로 AC 전원에서 DC 부하에 전력을 공급하기 위해서는 AC/DC 전력변환이 최소 한번 이상 필요하기 때문이다.

현재의 배전시스템은 DC 마이크로그리드를 적용하기에 유리한 환경으로 변화하고 있다. 신재생에너지 전원을 이용한 마이크로그리드, 스마트 빌딩 등 정보통신장비가 밀집된 건물의 배전시스템 등은 DC 마이크로그리드를 적용할 수 있는 최적의 대상으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신 산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었으며 (NIPA-2011-C1090-1121-0005) 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0014872)

참 고 문 헌

- [1] R.H. Lasseter, "Control and Design of Microgrid Components," PSERC Final Report, Jan. 2007.
- [2] N. Hatzigiargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE power & energy magazine, pp.78-94, Jul./Aug. 2007.
- [3] F. Katiraei, M.R. Iravani, "Power management strategies for a Microgrid with multiple distributed generation units," IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 4, pp.1821-1831, Nov. 2006.
- [4] I. Chung, W. Liu, D. Cartes, E. Collins, and S. Moon "Control Methods for Multiple Distributed Generators in a Microgrid System," IEEE Trans. Industry Applications. Vol.46, no.3, May/June 2010.
- [5] M.E. Baran and N.R. Mahajan, "DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 39, issue 6, Nov-Dec. 2003, pp. 1596 - 1601.
- [6] A. Sannino, G. Postiglione, and M.H. Bollen, "Feasibility of a DC Network for Commercial Facilities," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 39, no. 5, Sep-Oct. 2003, pp. 1499-1507.
- [7] Y. Ito, Y. Zhongqing, and H. Akagi, "DC Microgrid Based Distribution Power Generation System," IPEMC 2004.
- [8] N. Rasmussen, and J. Spitaels, "A Quantitative Comparison of High Efficiency AC vs. DC Power Distribution for Data Centers," White Paper 127, APC by Schneider Electric.
- [9] P. Savage, R.R. Nordhaus, and S.P. Jamieson, "DC Microgrids: Benefits and Barriers," From Silos to Systems: Issues in Clean Energy and Climate Change, 2010.
- [10] H. Pang, E. Lo, and B. Pong, "DC Electrical Distribution Systems in Buildings" ICPEA 2006
- [11] H. Kakigano, M. Nomura, and T. Ise, "Loss Evaluation of DC Distribution for Residential Houses Compared with AC System," IEEE IPEC 2010
- [12] M. Starke, L.M. Tolbert, B. Ozpineci, "AC vs. DC Distribution: A Loss Comparison" IEEE T&D 2008
- [13] 이준신, 김경해, 태양전지공학, 그린, 2008
- [14] Y. Ji, J. Kim, S. Park, J. Kim, and C. Won, "C-language based PV array simulation technique

considering effects of partial shading," IEEE International Conference on Industrial Technology 2009, Feb. 2009.

저 자 소 개

유 철 희 (柳 哲 熙)

1982년 6월 8일생. 2007년 국민대학교 전자공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전자공학부 석사 취득. 2009년~현재 동 대학원 전자공학부 박사과정

Tel : 02-910-5048

Fax : 02-910-4449

E-mail : cheol21c@kookmin.ac.kr

채 우 규 (蔡 又 圭)

1977년 4월 22일생. 2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5986

Fax : 042-865-5944

E-mail : wkchae@kepc.co.kr

김 주 용 (金 周 勇)

1969년 9월 27일생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 송배전연구소 선임연구원.

Tel : 042-865-5981

Fax : 042-865-5944

E-mail : kimjy@kepri.re.kr

정 일 엽 (丁 一 燁)

1976년 3월 16일생. 1999년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업. 2001년, 2005년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 석사, 박사 취득. 2005년~2006년 미국 버지니아텍 연구원, 2006년~2007년 ABB 방문연구원, 2007년~2010년 미국 FSU-CAPS 연구원,

2010년 9월~현재 국민대학교 전자공학부 전임강사

Tel : 02-910-4702

Fax : 02-910-4449

E-mail : chung@kookmin.ac.kr

홍 성 수 (洪 成 洙)

1961년 1월 25일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년, 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사, 박사 취득. 1984년~1999년 현대전자 정보통신 연구소 책임연구원, 1999년~현재 국민대학교 전자공학부 정교수

Tel : 02-910-4701

Fax : 02-910-4449

E-mail : hongss@kookmin.ac.kr