특집 : 직류배전기술

실생활환경 그린IT 직류배전 기술 실증 테스트베드 구축

배 현 수
(서울대 공학연구소 선임연구원)

실생활환경 그린IT 기술 실증 테스트베드는 최근 에너지절감을 위한 하나의 해법으로 논의되고 있는 단위 건물에 대한 직류배전 기술 이외에 건축기술 기반의 공간, 냉난방, 환기, 빛 환경 에너지 성능평가 기술과 주택 유형별, 가구별 전력에너지 관리 기술, IT기반 기술 등을 활용하여 그린IT기반 요소기술의 성능 검증, 기술개발, 신시장창출을 위한 실증테스트환경 모델과 산업활성화 기반을 구축하는 것이다. 이 중 향후 완성될 실증 테스트베드 건물에 적용하기 위하여 본 기관에서 수행하고 있는 직류배전분야에서의 주요 연구내용 및 연구방향, 고려사항들을 논의하고자 한다.

1. 서 론

현재 보편화된 교류배전 계통에서 주택 및 상가, 빌딩과 같은 공공 상업용 또는 주거용 단위 건물에 대해 환경오염 문제에 근거한 에너지절감 해법에 있어, 최근 대두되고 있는 전력전자 기반기술 중 하나가 바로 직류배전분야이다. 이는 주로 기본적인 직류발전 형태의 성격을 가지는 태양광, 연료전지와 같은 신재생에너지 분산전원 시스템의 보급 가속화와 직류전력 소모에 바탕을 둔 배터리 사용 전기자동차의 현실화 요구, IT 직류사용 가전기기 증가 등으로 인해 직류발전-직류소모부하의 직접적 관계를 통한 중간 교류변환 손실 최소화로부터 기인한다. 실제로는 전력회사 계통에서부터 직류송전(가령, 국내 한반도와 제주도 간의 고전압직류송전)과 태양광 등의 분산전력발전소에 의한 장기적인 스마트그리드나 마이크로그리드와 같은 배전 구성이 가능할 수 있으나, 가장 현실적이며 단기간 내에 효과를 창출할 수 있는 건물 내 직류배전이 미국, 일본, 유럽 등 전 세계에서 초창기 도입연구로 시작되어지고 있다.[1-3]

단위 건물에 대한 직류배전 기술은 그림1에서 보이는 것과 같이 건물 입구까지는 현 교류배전 체계를 유지하여 전력회사의 송배전 계통을 유지하나, 건물 내 배전체계는 전력 도입 최앞단에서 대용량 AC-DC 전력변환기를 통하여 직류배전을 구현하는 시스템 구조이다. 최근 에너지절감에 대한 요구조건에 의해 단위 건물 내 사용되어지는 여러 전기기기에서 고효율에너지기자재품목과 역률에 의한 규제 강화로 인하여 대부분의 전기 · 전자기기가 역률보상회로를 개별로 각각 채용함에 따라, 개별로 수행되는 교류-직류 전력변환 과정을 하나로 통합하는 방식이 가장 주된 내용(상대적으로 전력변환 효율이 낮은 경부하영역에서의 동작을 줄이고 효율이 높은 중부하영역 이상에서 주로 동작하도록 구성)이다. 또한, 제안된 방식은 고품질의 전력공급을 위해 배터리를 사용하는 무정전 전원장치나 백업에너지저장장치, 직류발전 신재생에너지, 직류충전 전기자동차 등이 병행되어 사용될 경우 교류-직류-교류 전력변환의 백-투-백 과정을 생략할 수 있어 그 효과를 극대화할 수 있다.

따라서, 이미 다양한 분야에서 확보된 전력전자기술의 적용에 있어 건물이라는 건축전기와 전력에너지관리시스템을 위한 IT 융합기술 요소측면에서 시스템의 안정적 동작을 위한 신뢰성 및 거주자 안정성 확보를 위한 다각도적 측면에서의

그림 1 그린IT 직류배전 기술 실증 테스트베드

전력전자 시스템 활용기술 접근 연구가 향후 지속적으로 필요하다.

2. 단위 건물 직류배전 구성 요소기술

본 연구소는 지식경제부 2010년 산업원천기술개발 연구 과제를 토대로 기존 단위 건물에 대한 교류배전 시스템과 신규로 제안되는 직류배전 시스템에 대한 효용성 및 연관 산업 관련제품을 통합 비교할 수 있는 직류배전 실증연구 테스트베드 모델을 구축하고 있다. 이를 위해 현재까지 진행된 연구내용과 향후 시스템 구축과 관련하여 고려중인 다양한 연구방향들을 소개하고자 한다.

2.1 그린DC 빌딩 전력계 시스템 설계 기술

주거 또는 상업용 건물에는 일반 주택, 공장, 사무용 빌딩, 상가, 병원, 공공건물 등 다양한 형태의 구성을 가지고 있다. 해당 건물별로 사용하는 전력에너지의 정격과 부하패턴은 하나로 일원화하기가 어려우며, 또한 신재생에너지 및 에너지 저장장치 등이 추가된 분산전원 구성에서도 각각의 특성을 고려할 필요가 있다.

이에 단위 건물 직류배전 전력계 시스템의 최적화 설계를 위한 소프트웨어 설계 툴의 개발이 반드시 필요하며, 해당 개발 툴에서 고려되어야 할 요구조건으로는 배전전압 선정 및

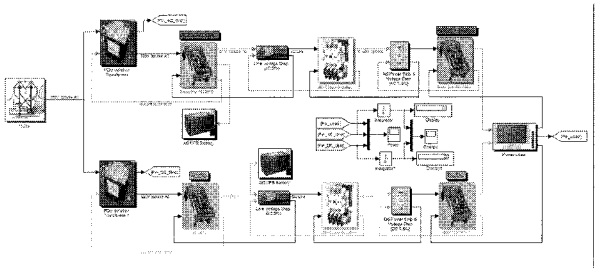


그림 2 MatLAB 기반 직류배전 시스템 설계 소프트웨어 예

배전구조에 따른 효율분석, 유기적인 소프트웨어 시뮬레이션을 구성 목적의 각종 전력변환장치 및 배전기기, 전기부하기기에 대한 구성요소 Component Model 기반 라이브러리, 최적화된 전력계 시스템 구성과 실생활 환경을 반영한 단위 건물 전력사용 부하패턴 및 부하 추정 알고리즘, 분산전원 구성을 위한 배전시스템 적용 전원소스 및 부하 용량 산정 등이 필요할 것이다.

직류배전 전력계 설계에서 현재 논의되고 있는 주요 사항들에는 다음과 같은 것들이 있다.

2.1.1 단위 건물 직류배전 표준전압

단위 건물에 대하여 직류배전을 구성함에 있어, 가장 중요하면서도 많은 논의의 대상이 되는 부분이 바로 배전전압이다. 주로 제안되고 있는 전압은 대표적으로 중전압(400V와 380V, 310V)과 저전압(48V와 24V)이 있으며 각각의 전압마다 장단점을 가지고 있다. 400V는 일반적으로 PFC를 채택한 개별 전기기기 내의 DC링크 전압에서 제안되었으나, 건축전기에서는 특수 3종 접지 대상이다. 380V는 400V와 유사한 전압으로 실제 PFC 채택 전기기기 내에 사용빈도가 400V보다 더 많으며, 건축전기 측면에서도 3종 접지대상이란 점에서 관심의 대상이 된다. 310V는 국내 환경의 220V 교류계통 하에서 특별한 전력변환장치를 포함하지 않고 간단히 다이오드 정류기만으로 구성이 용이하여 제안되어졌으나, 역률 규제나 향후 신재생에너지 연계에 따른 계통연계 양방향 운전을 고려할 경우 적절하지 않을 것으로 사료된다. 상기에 명시된 중전압의 경우 배전전압이 기존 교류 배전전압에 비하여 높아 기 구축 건물 내 배선을 변형 없이 재활용할 수 있을 가능성이 높아 또 다른 장점을 가지나, 상대적으로 저전압에 비해 높은 전압에서의 접속과 해제, 접지, 누설, 접촉 등의 안전대책에 대한 연구 기술개발이 반드시 수반되어야 할 것이다.

이에 반해 60V 이하 직류에 대한 인체접촉 안전성의 장점을 가지는 저전압 배전에서 48V는 기 통신시스템에서 채택하고 있는 표준전압인 -48V에서 기인한 것으로 완성제품을 통한 초창기 직류배전의 개념을 빠르게 적용하기 위해 주로 제

안된 전압이다. 그리고 24V는 대부분의 가전기기에서 실제 사용하는 직류전압이 24V 이하임에서 고려된다. 하지만 안전 대책에서 유리한 저전압 배전이지만, 이미 알려진 바와 같이 전력의 소모가 많은 건물에서 간선에서부터 도입하기엔 선로 전선의 크기 상승으로 인한 가격 및 설비의 부담이 있기에 간선이 아닌 사용자 최종 소모 부하선측에서 신규 시스템에 대한 소비자의 안전 신뢰성 확보를 위해 DC-DC 변환을 통한 설치를 고려해 볼 수 있을 것이다.

2.1.2 직류배전 배선 구조 및 배선 선정

앞서 언급한 것과 같이 사용되는 배전전압과 직접적인 연관관계를 가지는 것이 바로 배전구조(간선, 부하선)와 배선선정이다. 직류배전의 경우 배선의 길이에 따른 전압강하현상이 교류에 비해 강하게 나타난다. 이에 전력용량이 큰 건물이나 간선의 길이가 길어져야하는 고층 건물의 경우를 고려할 경우 중전압배전이 간선으로는 적절할 것이다. 또한, 신규 건물이 아닌 기존 건물에 대하여서도 중전압의 경우 기존 교류배선의 피크전압에 비해 상대적으로 높기에 기존 배선의 활용도 가능성이 높아 많은 장점을 가진다. 단, 안전측면에서 최종 부하배선에서의 중전압배전과 저전압배전은 추가적인 연구가 필요할 것이다. 그리고 기존 교류배선의 직류배전 활용 가능성을 언급하기는 하였으나, 안정적인 시스템의 운용 측면에서 직류배전용 전선에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 내압, 피복, 절연 등 다양한 특성에서 직류배선에 적합한 전용전선 개발 또는 대체 가능 교류전선의 선정이 필요하다.

2.1.3 주거 · 사무용 전기기기의 부하프로파일

가령 전기자동차와 같은 시스템의 최적 설계를 위하여서는 FTP75 등과 같은 자동차 표준 주행프로파일들을 현재 활용하고 있다. 이처럼 다양한 전력소모 형태를 가지는 주거 · 사무용 공간들에 대한 전력소모 부하프로파일을 수집, 분석하여 표준화하는 것은 향후 신재생에너지, 에너지저장장치 등을 결합하여 제로에너지 건물을 구성하는데 필요한 분산전원 용량, 전력변환기 용량, 주요 직류배전 구성요소 용량 설계 및 시스템 설계에 필수 핵심 데이터 활용 측면에서 기본적으로 선행되어야 한다.

사용자 인원 및 연령대별, 건물 유형별, 계절별, 전기기기별 등 모든 조건에 따른 부하프로파일 구성은 현실적으로 거의 불가능하나, 먼저 개별 가전 및 사무기기들에 대한 전력소모 프로파일을 구성 후 이를 결합하여 대표적인 분류로 가정할 수 있는 주택, 공장, 상가, 사무실 등 건물 유형별로 구성하는 접근방법을 고려할 수 있다.

2.1.4 직류배전 전력에너지관리시스템 구성

홈오토메이션 시장에서 출발하여 에너지관리 응용분야와

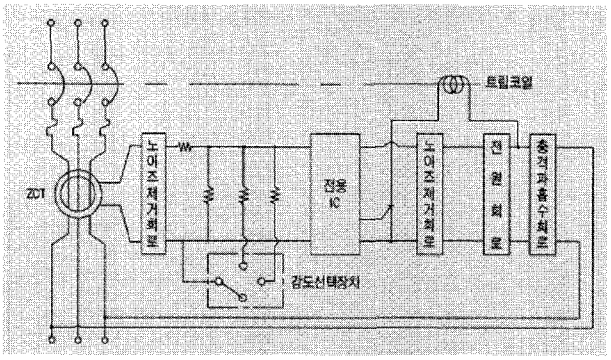


그림 3 누전차단기 원리 (LS산전 기술자료)

결합하면서 빌딩 등 현재 많은 이슈가 되고 있는 전력에너지 관리시스템의 구성도 고려되어야한다. 분산전원 시스템과 다양한 전력소모기기의 결합을 효과적으로 운용하여 최적의 전력관리 솔루션을 창출하기 위한 IT통신기술, 분산전원기술, 전력모니터링기술, 시스템 운용 알고리즘기술 등의 융합기술 분야로의 대비가 필요하다.

2.2 그린DC 빌딩 직류배전 구성요소 기술

2.2.1 고효율 고신뢰 대용량 전력변환기 개발

단일 건물에 대한 인입 전력전송이 직류가 아닌 현 체계에서 건물 내 직류배전을 위하여서는 이를 변환하기 위한 고효율 대용량 고신뢰성의 AC-DC 전력변환기가 필수이다. 해당 전력변환기의 제작의 경우 스케일러블 모듈 구성방식으로 설치 부하 전력량에 유기적으로 대응할 수 있어야 하고, 전체 직류배전 시스템 효율 향상을 위한 고효율이 필요하며, 안정적인 전력공급이 가능하여 한다. 이외 향후 신재생에너지나 에너지저장장치를 도입할 경우를 대비하여 단방향성이 아닌 양방향 전력 이동과 아일랜딩 기능이 가능한 구조로 설계가 필요하며, 개별 병렬 모듈의 결합에 대한 시스템 수준의 스마트 구동 제어방식 등의 도입으로 에너지 전달 효율을 개선하도록 해야 한다. 또한, 기존 교류 계통과는 달리 출력임피던스가 매우 낮지 않고 전력변환기를 통과한 배전이기에 그 크기가 유한하다. 이에 중앙 전력변환기 후단에 결합되는 여러 전력변환기와 부하 전원공급용 전력변환기들의 병렬 입력임피던스 결합으로 발생되어질 수 있는 시스템 Interaction 해석이 필요하다. 이는 전력용량에 의한 시스템 설계와 더불어 시스템 안정성을 위한 개별 배전용 및 전기기기 부하용 전력변환기의 설계변수가 될 것이다.

2.2.2 누전, 접지, 차단, 혼촉 방지 안전대책 수립

건물 내 직류배전을 위해 고려하여야 할 안전대책 장치로는 주로 과전류차단기, 누전차단기, 접지방식과 직류극성 혼촉

및 아크 방지 플러그, 콘센트, 커넥터 등이 있을 것이다. 먼저, 직류차단기는 지하철, 선박, 비행기, 원자력발전, 태양광발전, 전기자동차 등의 응용분야에 적용하기 위하여 개발된 제품이 있으나, 단일 건물 배전에 적합한 용량의 제품으로 수정, 최적화 작업이 추가적으로 필요할 것이다. 현재 시장에서 쉽게 구할 수 있는 제품으로는 직류 500V까지 활용할 수 있으며, 해당 제품의 차단 성능이 건물 배전에 적합한 수준인지의 성능평가를 통해 최적 제품의 구성이 필요하다. 누전차단기의 경우, 그림 3의 원리인데 이미 ZCT를 제외한 내부 전자회로의 경우 전원회로를 통해 직류로 구동하도록 제작되어있다. 이에 ZCT가 수행하는 전류 인입선과 회귀선과의 전류차이 감지 방식을 기존 교류에서와 동일 역할로 직류에서 동작하도록 수정 또는 개발할 수 있을 것으로 사료된다. 차단기와 누전차단기를 통한 배전함 구성, 전기기기 결합 및 분리, 간선과 분리의 배전구성 및 접지방식과 혼촉, 아크방지 구성 요소 제품의 경우 현재 가장 적절한 방식이나 제품이 거의 없으나, 전기자동차 응용분야와 비교한다면 비슷한 기술개발 형태로 시장동향 표준이 가능할 것으로 생각되며 시제품 도입을 통한 추가적 기술개발 또는 변경이 수행될 필요가 있다.

2.2.3 전력에너지 모니터링 · 진단 · 관리시스템

건물 내 직류배전은 지속적 이슈화와 기술개발이 진행 중인 스마트그리드 연계, AMI와 직류전력전송을 고려하지 않을 수 없다. 해당 상황이 도래할 경우를 대비한다면 전체 건물이나 각각의 분기간선에서의 전력소모량을 측정을 위해 향후 직류양방향전력량계의 개발이 필요할 것이다. 또한 이와는 별도로 현재 추구하는 그린IT 기술 적용 전력에너지 모니터링, 관리, 디스플레이, 고장유무 진단 등의 기능을 가지는 시스템 구성을 위하여서는 개별 부하기기, 배전구성 요소기기 등에 대한 직류전력측정 장치와 건축 환경에 적합한 IT 센서 · 통신 네트워크 시스템 개발과 적용이 고려되어야 한다.

2.3 그린DC 빌딩 직류배전 부하 전기기기 구현

2.3.1 직류부하 전기기기 전원입력 구성

최근 에너지절약에 대한 요구의 증대로 인해 전력소모가 70W 이상인 대부분의 많은 가전 · 사무기기에서 역률보상회로를 채택하고 있다. 이는 교류배전에서의 무효전력 저감 방법으로 직류배전에서는 해당 역할을 중앙 집중형 대용량 AC-DC 컨버터가 수행하기에, 부하 전기기기에서의 역률보상회로를 효과적으로 제거하여 부하기기에서의 전력소모 효율을 증대시킬 수 있다. 이때 고려하여야 할 부분으로는 단순히 일반적인 부스트회로의 제거뿐만 아니라, 홀드-업 시간에 의해 설계된 출력 DC링크 캐패시터의 최적화(직류배전 중앙컨버터에서 홀드-업 시간 보장 시 수명문제에서 가장 취약한 캐패시터의 감소 가능)와 메인 전력단 구동을 위한 보조전원 입력의 최적 전환(교류제품에서 효율증가를 위해 DC링크 전원이 아닌 AC 입력부의 직접적 사용 방식) 등이 있다. 또한, 일반적으로 역률보상회로 뒤편에 위치한 최종 부하단 DC-DC 컨버터의 경우 상대적으로 고주파이기에 기존 EMI 필터의 최적화, 캐패시턴스 변화에 따른 부하의 배전 연결 시 도립전류 억제회로 최적화 등이 고려되어야 할 것이다. 이외 부하 전원회로 입력단에 위치한 정류다이오드의 경우 효율 증대를 위하여서는 제거하는 것이 좋으나, 전기기기의 개방사고 상황에 생성된 아크전압에 의한 배전전압의 영향을 최소화하며 안전을 위한 자동적 기기분리로 추가 분석이 필요한 부분이다.

2.3.2 직류부하 전기기기 전원차단 구성

조명 등과 같은 저전력 전기기기에서는 전원의 온-오프 상황에서 교류전원을 직접 차단하는 기계식 구동형태가 많이 사용된다. 또한 최근 전자식 스위치 구동으로 완전 전력차단이 아닌 가전기기의 경우도 다수 있으나, 이 역시 제어전원을 제외하고는 주 전력회로의 경우 대기전력 저감을 위해 릴레이 등을 사용하여 입력 전원을 간헐적으로 차단하는 방식이 존재한다. 해당 경우를 직류부하 전기기기에 도입하려면, 대기전력 저감이나 기기의 온-오프 구동에 있어 단순히 전력변환회로 내 전력소자의 기동 중지만으로는 해결하기에 한계점이 존재한다. 주로 저전력 전기기기이기는 하나 직류전원 차단을 위한 직류릴레이의 최적 개발, 적용 또는 직류전기기기에 대한 대기전력 저감 연구들이 향후 수반되어야 할 것이다.

2.3.3 직류부하 전기기기 전원장치 구성

산업용 전기기기와는 달리 주거 · 상업용 건물에서 사용하는 전기기기에서는 저전력 소모로 인해 전력변환장치를 1stage로 채택한 기기(ex, DCM 구동 Flyback회로 등)들이 다수 있다. 또한, 세탁기, 에어컨 등 모터 채용 부하에서도 비록 인버터를 사용하고 있으나 입력 직류전원은 단순히 교류를 정류한 전압으로 전체 회로를 최적화하였다. 이외 비록 역률보상회로를 채택하였으나 DC링크전압이 600V 근처인 기기들도 있다. 해당 기기들의 직류배전 최적 적용을 위하여서는 비록 부하 전기기기의 동작 성능에서는 안정적일 수 있으나, 효율 최적화를 위하여 전력소자의 교체 또는 토폴로지 변형 등의 전력변환기 재설계 과정이 고려되어야 할 것으로 생각된다. 현재 교류배전에 적용되고 있는 모든 전기기기는 이미 오랜 시간과 많은 노력을 통해 전원회로 안정화, 최적화 엔지니어링을 수행하고 지금도 진행 중에 있다. 비록 전체 시스템적 구조측면에서 직류배전이 교류배전에 비해 에너지절약, 효율, 안정성 등 다양한 측면에서 장점을 가진다 하더라도 주요 요소기술의 최적 제품개발이 수반되어야만 그 효과를 극대화할 수 있을 것이기에, 앞으로 다양한 많은 연구와 기술개발 노력이 필요할 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 직류배전을 통한 그린IT 실증기술 테스트베드 구축에 관련된 연구 진행상황과 향후 연구방향에 대하여 간단하게 기술하였다. 본 기관은 단일 건물에 대한 신기술 적용을 위한 방안을 마련하고자 유관 기술개발의 연구 기관이나 대학, 기업들과의 유기적인 협력체계를 마련하여 지속적인 연구개발을 수행할 계획이다.

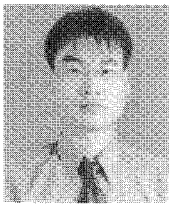
현재는 대학 연구소 수준의 직류배전 테스트베드를 구축하고 있으며, 제안 시스템의 효용성을 검증하기 위해 먼저 보급률이 높은 16대 가전기기와 일부 사무기기를 목표로 기존 교류배전과 동시비교가 가능한 테스트베드 구축을 진행하고 있다. 이를 기반으로 2012년 실거주가 가능하며 건축기술, IT 무선기술 등과 함께 융합된 직류배전 테스트베드 구현 전략을 수립하여 진행하고 있으며, 또한 다수의 기업들과 공동 기술개발을 통해 산업기반 조성 및 신시장 창출, 활성화에 이바지할 계획이다.

본 기사는 지식경제부(10030491-2010-01) 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[1] Green Building Power Forum 2009 Conference Proceedi- ngs, Darnell Group, Feb. 2009.
[2] DC Building Power Japan 2009 Proceedings, Darnell Group, Dec. 2009.
[3] Green Building Power Forum 2010 Conference Proceedi- ngs, Darnell Group, Feb. 2010.

〈필 자 소 개〉



배현수(裵鉉修)

1976년 1월 15일생. 2001년 창원대 공과대학 제어계측공학과 졸업. 2003년 창원대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2009년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공박). 2009년~2010년 서울대 BK21 정보기술사업단 박사 후 연수연구원. 2010년~현재 서울대 공학연구소 선임연구원.