

1000kW 급 전기시험시설의 회생제동 역기전력 처리용 전력 시스템 설계

유수호^{1,†}, 조범동¹, 정유진¹, 이창수¹, 김연준¹

¹주식회사 브이스페이스

Design of a Power System for Handling Regenerative Braking Back EMF in a 1000 kW Class Electric Test Facility

SuHo Yu^{1,†}, BumDong Cho¹, YuJin Jung¹, ChangSu Lee¹ and YeonJune Kim¹

¹V-SPACE Inc.

Abstract : 본 논문에서는 1000kW 급 전기시험시설에서 회생제동 시 발생하는 역기전력(재생에너지)을 효과적으로 흡수 및 활용하기 위한 슈퍼커패시터 기반 하이브리드 에너지 저장 전력 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템은 인버터의 DC 링크에 대용량 슈퍼커패시터 뱅크를 접속하여 회생 시 순간 발생하는 수백 kW 급 전력을 신속히 저장한 후, 양방향 DC/DC 컨버터를 통해 보조 배터리로 점진적으로 에너지를 전달하는 구조이다. 이를 통해 회생 시 DC 링크의 과도한 전압 상승을 억제하고 에너지를 회수함으로써, 기존의 저항 소모 방식 대비 에너지 효율과 시스템 안정성을 높였다. 본 논문은 시스템 구성도와 주요 부품 사양을 제시하고, 회생제동 시 전압/전류 파형 특성과 최대치에 대한 해석, 보호 회로 설계, 이론적 전력 흐름 시뮬레이션 결과를 상세히 논의한다. 또한 기존의 회생전력 처리 방식과 비교하여 응답속도, 발열, 수명, 설계 유연성 측면의 장점을 분석하고, 실제 대용량 시험시설에의 적용 가능성과 향후 확장 방향을 제안한다.

Key Words : Regenerative Braking System(회생제동 시스템), Supercapacitor Buffering(슈퍼커패시터 완충), Bidirectional DC/DC Converter(양방향 DC/DC 컨버터), High Power Electric Test Bench(고출력 전기시험시스템), Soft Start Circuit(소프트스타트 회로)

Acknowledgement : 본 연구는 브이스페이스(V-SPACE)의 자체 연구개발 과제로 수행되었으며, 시험설비 구축 및 회생에너지 실증에 협력해주신 모든 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

1. 서 론

대형 전기구동 장치나 전동기 시험시설에서 회생제동이 발생하면, 모터의 운동에너지가 전기 에너지로 변환되어 DC 링크로 역류하게 된다. 이때 적절한 처리가 이루어지지 않으면 DC 링크 전압이 급상승하여 장비 손상이나 시험 중단을 초래할 수 있다. 기존에는 회생전력을 저항 뱅크에서 열로 소모하는 방식이 주로 사용되었으나, 에너지 회수 효율이 0% 이고 대형 시스템에서는 발열과 냉각 부담이 크다. 또 다른 대안인 회생형 컨버터는 전력을 전력망으로 되돌릴 수 있지

만, 1000kW 급 피크 전력을 순간 송환하려면 고비용 컨버터와 안정적인 전력망 인프라가 필요하다.

배터리를 이용한 저장 방식도 있지만, 일반 배터리는 전력 밀도가 낮고 충방전 속도가 느려 수백 kW 급 회생전류를 직접 수용하기 어렵다. 급속 충전은 발열과 화학적 스트레스로 인해 배터리 열화와 수명 단축을 야기한다. 반면 슈퍼커패시터는 수십만 회 이상 충방전에 견디며, 수 ms 이내의 빠른 반응 속도와 낮은 ESR로 발열이 적고 충·방전 효율이 높아 회생제동에 유리하다. 이러한 특성 덕분에 슈퍼커패시터는 고출력

전력 완충소자로 주목받고 있으며, 전기차·도시철도 등에서 배터리와 병렬로 구성된 하이브리드 에너지 저장 시스템(HESS)에 적용되고 있다. 회생에너지를 먼저 슈퍼커패시터가 흡수하고 이후 배터리에 전달함으로써, 에너지 효율과 시스템 수명을 동시에 향상시킬 수 있다. 실제 철도 사례에서는 회생전력의 15~30%를 회수한 사례도 보고되었다. 이러한 배경 하에 본 논문에서는 1000kW 급 전기시험시설에 적합한 슈퍼커패시터 기반 회생전력 처리 시스템을 제안하고, 구성 및 작동 원리, 주요 부품, 파형 분석, 보호회로, 시뮬레이션 결과 및 기존 방식 대비 장점 등을 종합적으로 분석한다.

II. 본 론

본 논문에서 제안하는 시스템은 인버터의 DC 링크에 슈퍼커패시터 뱅크를 병렬 접속하고, 양방향 DC/DC 컨버터를 통해 보조 배터리와 연결하는 구조로 되어 있다. 회생제동이 발생하면 모터는 발전기로 동작하여 전류가 인버터의 프리휠 다이오드를 통해 DC 링크로 역류하게 되며, 슈퍼커패시터가 이를 즉시 흡수함으로써 DC 링크 전압 상승을 억제한다. 이후 저장된 에너지는 DC/DC 컨버터를 통해 보조 배터리에 점진적으로 전달되며, 필요 시 반대로 방전도 가능하다.

실제 1000kW 급 시험 환경에서 회생 시 DC 링크 전압이 최대 1000V까지 상승한 사례가 있었고, 이는 에너지 흡수 경로 부족으로 인한 과도현상으로 분석된다. 이를 고려하여 슈퍼커패시터 뱅크는 정격 900V, 컨버터 입력은 최대 950V 대응으로 설계되었으며, 본 구조를 통해 수백 kW 급 회생 전력도 안전하게 처리하고 에너지 손실 없이 저장 및 재활용할 수 있도록 하였다.

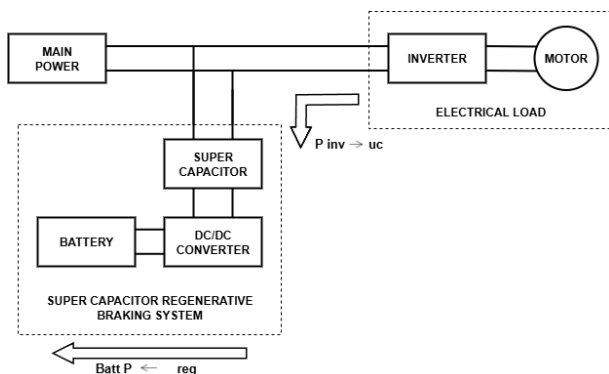


Fig. 1 1000kW 급 전기시험시스템의 회생전력 처리용 전력 시스템 구성도

슈퍼커패시터 뱅크는 YKY사의 450V 50F 모듈 2개를 직렬로 구성하여, 정격 전압 900V, 정전용량 25F로 설계되었다. 저장 가능 에너지는 약 10.1MJ (2.8kWh)로, 기존 시험환경에서 발생한 회생에너지(약 165kJ)를 충분히 흡수할 수 있는 용량이다. 낮은 내부저항(ESR mΩ 급)으로 인해 고출력 충방전에 적합하며, 각 셀 간 전압 불균형을 방지하기 위한 패시브 밸런싱 회로도 내장되어 있다. 슈퍼커패시터에 저장된 에너지는 양방향 DC/DC 컨버터를 통해 보조 배터리로 전달된다. 본 시스템에 적용된 컨버터는 입력 전압 600~950V, 출력 전압 300~750V 범위를 지원하며, 정격 출력은 30kW, 피크 시 50kW(10초)까지 동작 가능하다. 고속 스위칭과 과전압·과전류 보호기능을 갖춘 이 컨버터는, 회생 에너지를 안정적으로 처리하고 배터리 충전 시 전류를 제어함으로써 전체 시스템의 안전성과 효율을 높인다. Table 1은 해당 시스템의 주요 구성 요소와 제원을 요약한 것이다.

구성 요소	주요 사양 및 제원
슈퍼커패시터 모듈	· YKY 450V 50F 모듈 × 2 직렬 (정격 900V 25F) · 에너지용량 약 10MJ
DC/DC 컨버터	· 입력 600~950V / 출력 300~750V (양방향) · 정격전력 30kW (피크 50kW, 10 초)

Table 1 슈퍼커패시터 뱅크 및 DC/DC 컨버터 주요 사양

시험 시스템에서 모터에 회생제동이 걸리는 순간, DC 링크 전압과 전류는 특유의 과도 거동을 보인다. 슈퍼커패시터가 없는 경우, 회생 전류가 DC 링크의 기존 버스 커패시터에만 흐르게 되어 전압이 가파르게 상승한다. Fig. 2은 해당 시스템이 없을때의 전압 그래프이다. 반면 슈퍼커패시터가 연결된 경우, 추가된 큰 커패시턴스로 인해 전압 상승률이 크게 완만해진다. Fig. 3은 해당 시스템을 적용했을때의 전압 그래프이다.

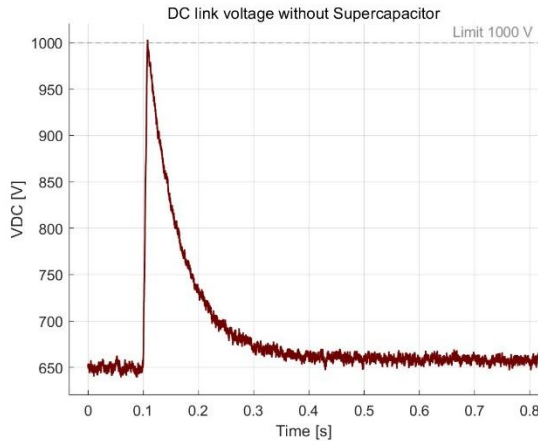


Fig. 2 DC link voltage without Supercapacitor

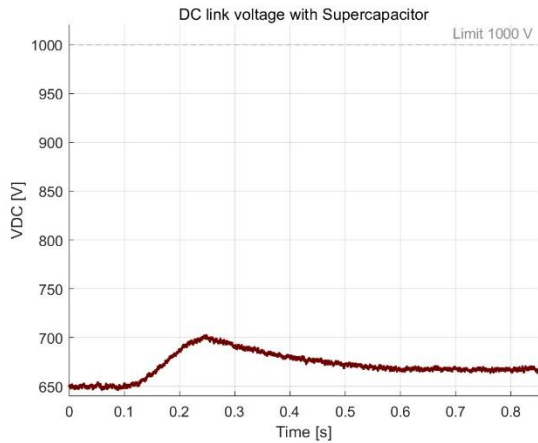


Fig. 3 DC link voltage with Supercapacitor

330kW급 회생제동이 0.5초 동안 발생할 때, 슈퍼커패시터가 있을 경우 DC 링크 전압은 약 650V에서 660V 수준으로 완만히 상승하지만, 없을 경우 불과 7ms만에 1000V 한계에 도달하여 제동이 차단된다. Fig. 2는 650V 운전중인 DC 링크에 약 330kW의 회생출력이 0.5초간 인가되는 상황을 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 슈퍼커패시터를 적용한 경우는 초기 650V이던 DC 링크 전압이 회생 에너지 유입 동안 완만한 선형 상승을 보이며 약 660V 수준에서 안정화된다. 0.5초간 슈퍼커패시터에 충전된 에너지는 약 165kJ로 계산되며, 이는 슈퍼커패시터 뱅크 용량(10MJ)에 비해 매우 작은 양이므로 전압 상승이 수십 V에 그친 것이다. 반대로 슈퍼커패시터가 없을 경우, 동일한 회생 전류에 대해 DC 링크 전압이 폭증하여, 불과 0.0076초(7.6ms) 만에 보호 한계 전압인 1000V에 도달한다. 이에 따라 인버터는 회생제동을 즉시 중단하거나 별도의 브레이크 초퍼(제한기)에 의해 잉여 에너지를 강제 소모하게

된다. 결국 슈퍼커패시터가 없을 경우 회생에너지의 대부분(98~99%)이 회수되지 못하고 낭비되며, DC 링크 과전압으로 시스템 운용에 제약이 발생한다. 슈퍼커패시터 적용 시스템은 DC 링크 전압의 피크를 효과적으로 억제함으로써, 최대 수백 kW에 달하는 회생 전력도 안전하게 저장할 수 있음을 확인할 수 있다.

회생제동 시 전류 분포를 살펴보면, 인버터로부터 역류하는 총 회생전류는 슈퍼커패시터 충전 전류와 DC/DC 컨버터/배터리로 흐르는 전류의 합으로 분배된다. 회생 초기에 DC/DC 컨버터가 오프(OFF)되어 전력 전부가 슈퍼커패시터로 흘러 들어가 전압을 상승시킨다. 시간이 경과하여 슈퍼커패시터 전압이 상승하면, 제어기를 통해 DC/DC 컨버터가 ON되어 배터리로 일정 전류가 흘러가도록 함으로써 역기 전력을 줄이고 슈퍼커패시터의 과도한 전압 상승을 방지한다. 슈퍼커패시터 전압이 설정된 상한(예: 900V)에 도달하면 DC/DC 컨버터는 가능한 최대 전류로 배터리를 충전하고, 그래도 남은 회생전류는 인버터 제어를 통해 모터에 재분배하거나 최후 수단으로 브레이크 저항에 보내도록 설계한다. 이러한 다이나믹한 전류 분배 제어를 통해 슈퍼커패시터 과충전을 방지하면서도 회생에너지를 최대한 회수할 수 있다.

제안된 시스템의 동작을 이론적으로 해석하기 위해 등가 회로 모델을 활용할 수 있다. 인버터와 모터/발전기 부분은 회생제동 시 전류원으로 모델링되며, 슈퍼커패시터 뱅크와 DC 링크 커패시터는 합쳐서 하나의 등가 커패시터로 나타낼 수 있다. 또한 DC/DC 컨버터 및 배터리 조합은 필요한 경우 전류를 흘릴 수 있는 제어 전류원으로 등가 모델링된다. 회생모드에서의 기본적인 회로방정식을 세우면 다음과 같다.

$$i_{regen}(t) = i_{sc}(t) + i_{Batt}(t) \quad \text{Eq. 1}$$

$$i_{sc}(t) = C_{eq} \cdot \frac{dv_{sc}(t)}{dt} \quad \text{Eq. 2}$$

$$v_{sc}(t) = v_{DC}(t) \quad \text{Eq. 3}$$

회생이 시작되는 시점에 배터리 충전 전류가 0이라면, 모든 회생 전류는 슈퍼커패시터로 유입되어 DC 링크 전압이 선형적으로 상승한다. 이후 전압이 일정 수준 이상으로 올라가면 DC/DC 컨버터가 동작하여 일부 전류를 배터리로 전달하고, 슈퍼커패시터 전류는 점차 감소하면서 전압 상승도 완화된다. 회생이 종료되면 DC 링크 전압은 다시 초기 상태로 복귀하고 회로는 안정적

으로 돌아간다. 이러한 거동을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 기반의 시뮬레이션을 수행하였다. 1000kW급 시험 조건에서 제안한 슈퍼커패시터 및 DC/DC 컨버터 구조를 적용한 결과, 회생 에너지를 안정적으로 흡수하며 DC 링크 전압을 900V 이하로 유지함을 확인했다. 예를 들어, 330kW의 회생 전력이 0.5초간 발생한 후 30kW급 컨버터로 배터리를 충전한 경우, 약 6초 내에 전압이 복원되었고 회생 에너지의 약 97%가 저장되었다. 컨버터 용량을 20kW로 줄인 경우에도 에너지 전달은 10초 이내로 완료되었으며, 전압 안정성은 유지되었다. 이 결과는 제안 시스템의 실효성과 적용 가능성을 뒷받침한다.

슈퍼커패시터는 전기이중층에 전하를 물리적으로 저장하므로, 마이크로초에서 밀리초 수준의 매우 빠른 응답 속도를 보인다. 따라서 회생전류가 발생하자마자 전압 상승을 억제하며 에너지를 흡수할 수 있다. 반면, 브레이크 저항은 전압이 일정 임계치 이상 도달해야 동작하며, 배터리는 화학 반응 특성과 제어 제한으로 인해 고속 전류 수용이 어렵다. 본 시스템은 이러한 제약 없이 즉각적인 회생 대응이 가능하다.

회생전력을 저항으로 소모하는 방식은 100% 손실이며, 방열 시스템이 추가로 요구된다. 반면 제안 시스템은 회생전력을 슈퍼커패시터에 저장한 후 배터리로 전달하므로 손실이 최소화된다. 또한 ESR이 낮아 발열이 적고, 전체 시스템의 열 스트레스도 감소한다. 이로 인해 효율이 크게 향상되며 냉각 부담도 줄어든다.

슈퍼커패시터는 수십만 회 이상의 충방전에 견디는 반영구적인 수명을 가지며, 열화가 거의 없다. 반면 배터리는 반복된 고출력 충방전 시 수천 회 이내에서 성능 저하가 발생한다. 제안 시스템은 슈퍼커패시터가 초기 충격을 흡수함으로써 배터리의 스트레스를 줄여 수명을 연장시키고, 인버터 및 전력 소자도 안정적으로 보호할 수 있다.

슈퍼커패시터와 배터리는 모듈 단위로 구성되어 시스템 용량을 손쉽게 조정할 수 있다. 고출력 환경에는 슈퍼커패시터를 확장하고, 장시간 시험에는 배터리 용량을 증가시키는 방식으로 최적화가 가능하다. 이러한 유연성은 경제성, 공간 활용 측면에서도 유리하다.

슈퍼커패시터는 화학 반응 없이 동작하여 폭발 위험이 낮고, 환경 친화적이다. 회생전력의 재활용은 전력 사용량 절감과 전력망 품질 개선에 기여하며, 피크 부하를 줄이는 효과도 제공한다. 종합하면, 본 시스템은 기존 단일 방식 대비 빠

르고 효율적이며, 시험 장비 보호와 에너지 절감 모두에 효과적인 솔루션이라 할 수 있다.

본 설계는 330kW급 회생 피크를 갖는 1000kW 시험 시스템을 기반으로 제안되었으나, 동일한 구조를 수 MW급 대형 전기시험설비로도 확장 적용할 수 있다. 슈퍼커패시터 뱅크는 직렬 구성에 따라 수천~수만 Farad까지 용량 확장이 가능하며, DC/DC 컨버터 역시 용량 증설을 통해 회생 지속시간이 길거나 에너지량이 큰 환경에 대응할 수 있다. 다만, 시스템 확장 시 슈퍼커패시터의 물리적 크기와 비용 증가에 유의해야 하며, 필요 시 일부 회생 전력을 그리드로 송환하거나 제동저항과 병행 운용하는 하이브리드 구성도 고려할 수 있다. 본 시스템은 모듈형 구조로 되어 있어 기존 시험설비에 병렬로 추가하는 레트로핏 적용이 용이하며, 기존 제동저항과 병렬 운용하여 초기 회생에너지는 슈퍼커패시터가 흡수하고, 초과분은 저항으로 처리하는 이중 보호 방식도 구현 가능하다. 향후 확장 방향으로는, 회생전력을 단순 저장에 그치지 않고 시험장치의 구동 전력원으로 재활용함으로써 피크 전력 수요를 저감하고 에너지 자립도를 높이는 전략이 제안될 수 있다. 또한, 고밀도 슈퍼커패시터나 전고체 배터리의 도입을 통해 시스템의 부피 대비 에너지 효율을 높일 수 있으며, 회생 예측 기반의 SOC 제어 알고리즘을 접목하면 에너지 분배 효율과 시스템 수명도 함께 향상시킬 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 1000kW급 전기시험시설에서 발생하는 회생제동 역기전력을 효과적으로 처리하기 위해, 슈퍼커패시터-배터리 기반 하이브리드 전력 시스템을 제안하고 이를 설계·해석하였다. 900V 25F의 슈퍼커패시터 뱅크와 20~30kW급 양방향 DC/DC 컨버터를 통해 회생 전력을 신속히 흡수하고 DC 링크 전압을 안정적으로 유지함으로써, 인버터 보호 없이 연속 운용이 가능함을 확인하였다. 또한 소프트스타트, 과전압 차단, 셀 밸런싱 등 보호회로를 통해 시스템의 신뢰성을 확보하였다.

제안 방식은 기존 브레이크 저항이나 배터리 직접충전 방식 대비 응답속도와 에너지 효율 면에서 우수하며, 모듈형 구조를 통해 다양한 규모의 시험설비에 유연하게 적용될 수 있다. 향후 실증시험과 에너지 관리 알고리즘을 접목한 고도화를 통해, 보다 친환경적이고 스마트한 시험환경으로 확장 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Siluvai, A. M., et al. (2013). *Supercapacitor Supported Topology for Electric Vehicles*. IJET.
- [2] Jiao, Y., et al. (2017). *Hybrid Energy Storage System for Urban Rail Transit*. Energies, 10(5).
- [3] Mohamed, M., et al. (2022). *Review on Hybrid Energy Storage for Regenerative Braking*. RSE Reviews, 153.
- [4] Liu, Z., et al. (2021). *Survey of Regenerative Braking in Railways*. IEEE Trans. Transp. Electr., 7(3).
- [5] Kim, D. S., et al. (2018). *Simulation Study with Supercapacitor in Traction System*. JEET, 13(2).
- [6] Lee, H. W., et al. (2017). *Regenerative Energy Recovery with Ultracapacitor in Railway*. JPE, 17(3).
- [7] Park, J., et al. (2019). *Soft Start Circuit for Supercapacitor DC/DC*. JPE, 19(3).
- [8] Kumar, A., & Kumar, N. (2021). *Bidirectional DC/DC Converter for EV with SC*. IJPEDS, 12(1).
- [9] Schaltz, E., et al. (2009). *Impact of SC Sizing on Battery Life*. IEEE Trans. Veh. Tech., 58(8).
- [10] Brusa Elektronik AG. (2023). *Bidirectional DC/DC Datasheet*.

†교신저자 (Corresponding Author)

E-mail: ysh9728@vspacecompany.com

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering
