

중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템용 여자코일의 절연 설계

이재홍, 황현지, 이승환
서울시립대학교

Insulation Design of Excitation Coil for Medium-Voltage Multilevel Inductive Power Transfer System

Jaehong Lee, Hyeonji Hwang, Seung-Hwan Lee
University of Seoul

ABSTRACT

중전압 멀티레벨 무선전력전송 시스템은 복수의 여자코일을 사용하여 멀티레벨 컨버터의 출력을 급전 코일로 전달한다. 시스템의 안전을 위해 여자코일과 급전 코일 사이에는 높은 절연 내력이 요구된다. 본 논문은 여자코일의 절연 설계 방법을 제시한다.

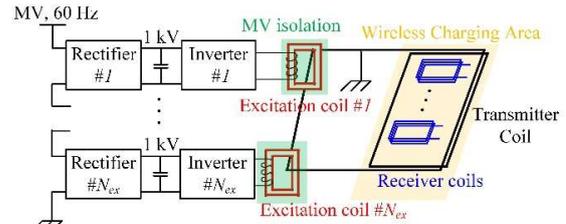


그림1 여자코일을 이용한 멀티레벨 무선전력전송 시스템 [4]
Fig.1 Multilevel inductive power transfer system with excitation coils

1. 서론

기존 대용량 무선전력전송 시스템은 계통 변압기(60 Hz)를 이용하여 중전압(25 kV) 계통을 저전압(<1.5 kV)으로 낮춰 전력변환을 하였다. 하지만 계통 변압기의 낮은 전력밀도를 개선하기 위해 높은 스위칭 주파수에서 동작하는 멀티레벨 컨버터에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [2]. 하지만 기존의 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 제안한 연구들은 중전압 절연을 고려하지 않았다 [3]. 본 연구에서는 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 여자코일의 절연 최적 설계 방법을 제안한다.

2. 여자코일을 이용한 멀티레벨 무선전력전송 시스템

그림1에는 여자코일을 이용한 멀티레벨 무선전력전송 시스템이 있다. 멀티레벨 정류기와 인버터를 사용하여 중전압 계통을 고주파 저전압으로 변환한다. 인버터의 출력에는 여자코일이 연결되어 있고 여자코일은 동기화된 자기장을 생성한다. 이 자기장들은 급전코일에서 모두 더해져 큰 전류를 발생시킨다. 급전코일 위에 위치한 집전코일들은 급전코일이 생성한 자기장으로부터 유도전압이 발생하여 전력을 획득할 수 있다. 본 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 장점은 중전압 계통으로부터 충전지역에 설치될 급전 및 집전코일을 여자코일을 이용하여 절연할 수 있다는 점이다. 중전압 계통 및 멀티레벨 컨버터의 전위는 수십 kV까지 상승할 수 있으며, 이를 절연하기 위한 함체는 매우 커져야 하며, 수 m 이내로는 충전 차량 및 탑승자의 접근을 제한해야 한다. 멀티레벨 컨버터와 급전코일을 여자코일을 사용하여 절연하고 급전코일을 대지에 접지하게 되면 급전코일의 전위는 수 kV를 넘지 않아 절연이 용이하다. 또한 충전 지역을 중전압 컨버터와

분리시킬 수 있어 사용자의 안전이 확보된다.

3. 중전압 여자코일의 제안한 절연 설계 방법

기존 연구들의 중전압 절연 설계 방법은 유한요소해석 시뮬레이션에 의존하는 경우가 많다 [4]. 하지만 유한요소해석 기반의 절연설계는 수많은 시행착오를 겪어야 한다. 유한요소해석 시뮬레이션에서 E-field의 세기가 각 물질의 절연 내력보다 높으면 절연과파가 발생할 수 있다고 판단한다. 만약 설계된 형상에서 절연과파가 발생하여 취약한 부분을 보강하면, 그 다음 절연이 취약한 지점에서 다시 절연과파가 발생한다. 또한 유한요소해석 시뮬레이션으로는 절연구조물의 재질 및 형상이 어떻게 절연 내력을 결정하는지 이해하기 어렵다. 본 연구에서는 가우스 법칙을 사용하여 여자코일의 절연 내력을 계산하고 최적 설계 방법을 제안한다.

여자코일의 절연 내력 계산 방법은 저자의 선행연구에서 개발되었다 [5]. 그림2에는 여자코일의 주요 절연과파 경로가 있다. 그림3(a)에는 그림2의 여자코일과 급전코일 사이의 절연과파 경로를 물리적 순서로 배치된 등가회로가 있다.

하지만 이 등가회로로 절연 내력을 계산하게 되면 시뮬레이션

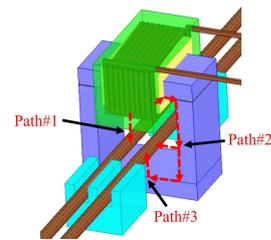


그림2 여자코일의 주요 절연과파 경로
Fig.2 Insulation breakdown paths for excitation coil.

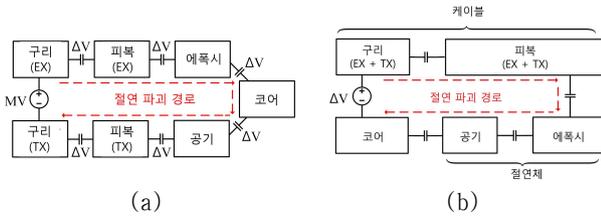


그림3 여자코일 절연 모델. (a) 등가회로. (b) 재배열된 등가회로.
Fig.3 Insulation models for excitation coil.

및 실제 절연시험과 상이한 결과를 얻게 된다. 그림3(b)와 같이 각 물질의 순서를 재배열한 뒤, 원기동좌표계에서 이 모델의 전체 전하량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{\Delta V}{\int_{r_{cop(EX,TX)}}^{r_{tef(EX)}} \frac{1}{2\pi\epsilon_i\epsilon_{tef}\rho} d\rho + \int_{r_{tef(EX)}}^{r_{poi(TX)}} \frac{1}{2\pi\epsilon_i\epsilon_{poi}\rho} d\rho + \int_{r_{poi(TX)}}^{r_{pvc(TX)}} \frac{1}{2\pi\epsilon_i\epsilon_{pvc}\rho} d\rho + \int_{r_{pvc(TX)}}^{r_{epo}} \frac{1}{2\pi\epsilon_i\epsilon_{epo}\rho} d\rho + \int_{r_{epo}}^{r_{air}} \frac{1}{2\pi\epsilon_i\epsilon_{air}\rho} d\rho + \int_{r_{air}}^{r_{fer}} \frac{1}{2\pi\epsilon_i\epsilon_{fer}\rho} d\rho} \quad (1)$$

그 다음 전체 전하량으로부터 원기동의 반지름 ρ 에 대한 E-field의 세기를 계산할 수 있다.

$$E(\rho) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_i\epsilon_r\rho} \quad (2)$$

그림4에는 주요 절연과피 경로를 따라 계산 및 시뮬레이션한 E-field의 세기가 있다. 계산 결과가 시뮬레이션과 잘 맞는 것을 알 수 있다. 각 물질의 절연내력과 E-field 세기를 비교하면 이 절연 구조물에서 절연과피가 발생할 수 있는 가장 취약한 지점은 에폭시와 공기 사이의 경계면인 것을 알 수 있다. 따라서 여자코일의 절연 설계에서 에폭시와 공기 사이의 경계면의 E-field만 계산하면 절연성능을 평가할 수 있다.

그림5에는 각 절연물질의 두께를 변화해가며 계산한 여자코일 최적 설계 결과가 있다. 절연 취약지점은 에폭시와 공기사이의 경계면에서 공기의 절연 내력인 3 kV/mm보다 낮은 2 kV/mm의 E-field를 갖도록 설계하였다. 또한 릴럭턴스

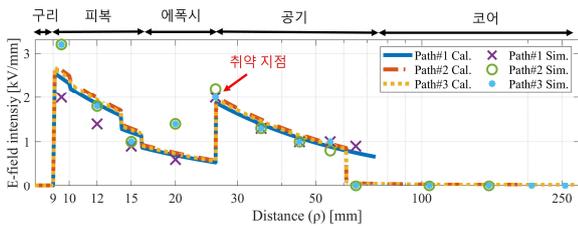


그림4 E-field 세기의 계산 및 시뮬레이션 결과
Fig.4 Calculated and simulated E-field intensity

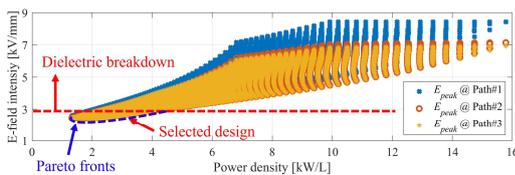


그림5 여자코일 최적 설계 결과.
Fig.5 Optimization of excitation coil.

모델과 Steinmetz's equation을 통해 코어 손실을 계산하여 효율 등 다른 성능지표를 동시에 검토할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 위한 여자코일의 중전압 절연 설계 방법이 제시되었다. 가우스법칙을 사용하여 여자코일과 급전코일 사이의 절연 성능을 계산할 수 있다. 이를 기반으로 코일의 효율, 전력밀도 뿐만 아니라 절연도 최적 설계에 포함시킬 수 있다.

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 중견연구사업의 지원을 받아 수행되었음.
(No. 2021R1A2C2009335)

참고 문헌

- [1] Bu, H., Lee, Y., Cho, Y. et al. "Neutral section passing strategy preventing inrush current for electric railway solid-state transformers," in *J. Power Electron.* 21, 1135-1143 (2021).
- [2] G. Guidi, S. D'Arco, K. Nishikawa and J. A. Suul, "Load Balancing of a Modular Multilevel Grid-Interface Converter for Transformer-Less Large-Scale Wireless Electric Vehicle Charging Infrastructure," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 4587-4605, Aug. 2021.
- [3] T. B. Gradinger, U. Drofenik and S. Alvarez, "Novel insulation concept for an MV dry-cast medium-frequency transformer," *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Warsaw, Poland, 2017, pp. P.1-P.10.
- [4] J. Lee, E. Noh and S. -H. Lee, "Development of A Medium-Voltage Isolated Excitation Coil for A Transformerless Multilevel Inductive Power Transfer System," *2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia)*, Jeju Island, Korea, Republic of, 2023, pp. 2039-2045.