

궤도 차량용 유도 급전/집전 장치의 특성평가

한경희*, 이병송**, 백수현*, 권삼영**, 박현준**

*동국대학교 전기공학과, **한국철도기술연구원 전기신호연구본부

The performance of inductive power collector used for railway vehicle system

K.H.Han*, B.S.Lee**, S.H.Baek*, S.Y.Kwon**, H.J.Park**

*Dongguk Univ. Electric Dept., **KRRRI Signaling & Electrical Engineering Research Dept.

Abstract - This paper suggests the inductive power collector using electromagnetic induction for railway vehicle such as the PRT(Personal Rapid Transit) system. Some ideas for inductive power collector design to improve the power transfer performance are presented.

The inductive power of secondary part is related to amount of linked flux to secondary part by the length of air-gap, which is expected by such a system parameter as leakage reactance and magnetizing reactance.

This paper will study for some performance of traditional transformer from equivalent circuit considering leakage reactance

각종 소형궤도 시스템 차량의 급전용량 및 차량의 승차 인원과 무게 등을 나타낸다.

〈표 1〉 해외 소형궤도 시스템 사항

| | Taxi2000 | PRT2000 | ULtra | Austrans |
|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 개발국가 | 미국 | 미국 | 영국 | 호주 |
| 탑승정원 및 차량무게(만차) | 3명 (340kg) | 4명 (2,041kg) | 4명 (800kg) | 9명 (3,025kg) |
| 운행속도 (km/h) | 40 | 48 | 25~45 | 70~120 |
| 급전용량 (주행시:kW) | 4~20 | 8~40 | 2~12.5 | 42~156 |

1. 서 론

최근 환경 친화적인 시스템 개발 및 에너지에 대한 연구가 부각되고 있는 가운데 근래 교통시스템 분야에서 전기자동차, 신교통 시스템 등의 친환경적 교통수단의 개발이 활발하게 진행 중에 있다.

최근 전기자동차는 환경오염 문제의 대안적인 교통시스템으로 제시되었음에도 불구하고 짧은 1회 충전 주행거리와 긴 충전시간 등 아직 개선되어야 할 문제를 가지고 있다. 또 경량전철의 경우, 기존 접촉에 의한 전력 공급 장치는 유지보수 및 관리비용이 높을 뿐만 아니라 미관상으로도 환경친화성이 낮고 우발적인 접촉으로 인한 사고 등 안전문제가 발생하는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 PRT 시스템 차량에서부터 시작하여 향후 용량 증대와 더불어 친환경적인 유도 전력 급전 시스템이 다양한 규모와 주행형태를 요구하는 전기 철도 시스템에의 적용을 예상하여, 유도 전력 급전/집전장치의 개념을 제시한다. 또한 유도 전력 급전/집전장치가 일반적으로 사용되는 공극이 없는 변압기, 혹은 공극이 있다하더라도 공극길이의 변화가 없어 고정 인덕턴스를 가지는 종래 변압기와 특성차이를 보고자 한다. 공극에 의한 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스의 값을 계산하고, 집전장치의 자화에 필요한 무효전류의 영향을 알아보고자 한다. 큰 공극은 유도 전력 급전 장치 주변에 보상회로를 필요로 하는데 이 이전에 급전/집전장치 자체의 특성을 알아보았다.[1]-[4]

2. 본 론

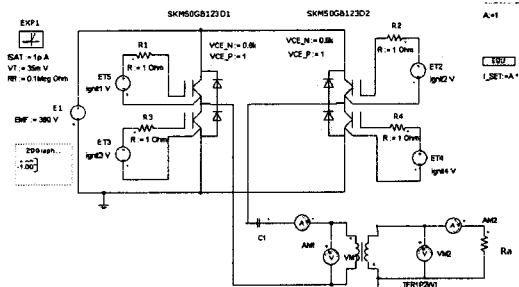
2.1 적용 가능한 궤도 차량시스템

본 논문에서 제안하는 유도 전력 급전 시스템의 적용을 위해서는 우선적으로 차량의 요구전력 규모가 기존 궤도 전기 차량에 비해 작으며, 현재 활발하게 연구 개발 중에 있는 선진국의 다른 소형궤도 운행 시스템의 사양에 대해서 알아볼 필요가 있다. 다음 표 1은 미국, 영국, 호주에서 기술개발단계, 혹은 상용화를 눈앞에 두고 있는

탑승인원이 4명이고 만차시 무게가 800kg이며, 운행속도는 평균 40km/h인 소형궤도 시스템을 개발 목표로 삼을 경우, 주행 중에 요구되는 급전용량은 대략 25kW 정도로 예상할 수 있다. 그러나 표 1에서 제시된 소형궤도 시스템의 급전방식은 대부분 제 3궤조 혹은 배터리 충전방식인 기존 철도시스템의 급전방식이 적용되었다. 이러한 용량의 궤도 전기 차량을 시작으로 향후 배터리 시스템의 용량 증대와 집전성능 향상과 함께 유도 전력 급전 시스템은 다양한 전기 궤도 차량에서의 활발한 적용을 예상 할 수 있다.

2.2 유도 전력 급전 시스템

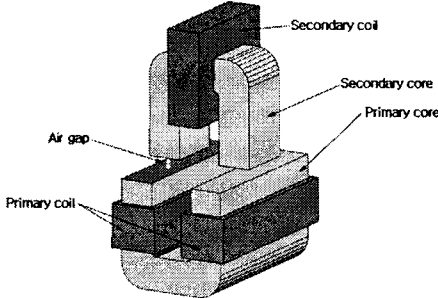
유도 전력 급전 장치의 구성은 다음과 같다. 1차측 전력전송부에서는 3상의 교류를 받아 저 왜곡 정형교류를 공급하는 전원 공급장치와 보상회로, 그리고 2차에는 유도 전력 급전 장치로 유도 전력 급전 시스템이 구성된다. 보다 완벽한 유도 전력 급전 시스템의 구성을 위해서는 2차측에 누설 인덕턴스 보상회로(공진회로)부를 추가하여 여기에 모터제어를 위한 제어기와 직류전원을 인가해주는 스위칭 모드 컨버터, 그리고 충전장치부의 설치가 가능하다.



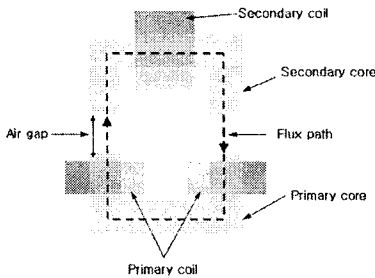
〈그림 1〉 유도 전력 급전 시스템

2.2 유도 전력 집전 장치

그림 2는 1차 전력전송부와 2차 유도 전력 집전 장치의 형상을 나타낸다. 그림 3은 그림 2의 유도 전력 집전 장치의 개념 및 자로를 단면에서 나타낸다. 2차 유도 전력 집전 장치를 이동차량의 하부에 설치할 수 있으며, 1차 전력전송부는 도로 지표표면에 매설이 가능하다.



〈그림 2〉 유도 전력 급전/집전 장치



〈그림 3〉 유도 전력 급전/집전 장치 평면도

1차 전력전송부는 1차 철심을 가지며, 2차 코일과의 자로 경로를 단축하기 위하여 권선이 1차 철심의 종단부에 감겨져 있는 상태이다. 2차측 무접촉 집전장치의 철심은 1차측의 철심에 비해 폭이 좁으며, 2차 권선의 누설인덕턴스 부분은 감소하고자 권선을 철심의 중앙에 집중하여 감았다. 용량에 따라 구성을 늘리는 것이 가능하며, 또한 공극길이에 따라 출력의 조절도 고려할 수 있다.

2.3 공극에 의한 여자전류

1, 2차측 철심이 차량의 이동을 위해서 분리되어 있기 때문에, 공극의 변화를 예상 할 수 있다. 이러한 큰 공극은 공극의 변화를 거론하기 이전에 자기적으로 큰 저항을 가지므로 큰 누설 자속과 큰 자화전류의 발생을 예상 할 수 있다

유도 전력 급전/집전 장치의 효율을 극대화하기 위하여, 장치의 리액턴스 값들(자화, 누설 리액턴스)이 최소화 되는 것이 바람직하다. 실제적으로 이러한 파라미터를 제어하기 위해서는 기기의 등가회로가 완성되어야 한다. 등가회로의 목적은 기기의 출력에 영향을 미치는 일종의 전달함수를 구하는 것인데, 이러한 일련의 행위들은 장치의 물리적 이해에서 비롯된 점임을 감안하여 볼 때, 본 논문에서 제안하는 유도 전력 급전/집전 장치의 물리적 이해는 기존의 변압기에서 행해졌던 것과는 분명 다른 점을 갖는다.

유도 전력 급전/집전 장치는 큰 공극을 갖기 때문에 2차측에 전력을 유기하도록 여자시키려면 많은 전력이 필요하다. 이는 공극으로 인한 릴럭턴스의 증가로 이해할 수 있다. 분명 자화전류의 양은 증가하게 된다.

기존의 변압기 등가회로를 구성하려면, 우리는 교과서에서 배운 방식대로 open test와 short test를 거쳐 등가 파라미터를 구한다. 그러나 이러한 기존 방식을 그대로

따라서 유도 전력 급전/집전 장치의 등가회로를 구성하다 보면, 놓치는 파라미터가 있는데 그것은 다음 아닌 누설 리액턴스이다.

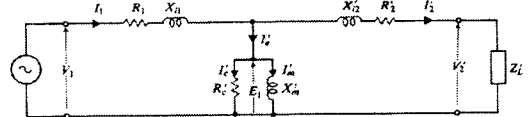
본 연구에서는 기존 등가회로 파라미터 도출 방식에서는 생략했던 누설 리액턴스를 감안하여 새로이 open, short test를 실시하여 큰 공극을 가지는 유도 전력 급전/집전 장치의 무효전력에 대한 특성을 알아보는데 초점을 두고 있다.

2.4 유도 전력 급전/집전 장치 등가회로

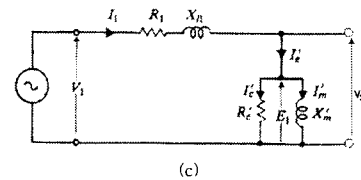
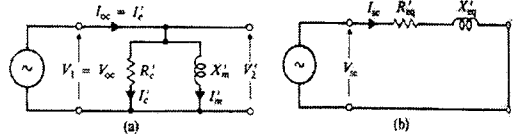
일반 변압기에서 사용하는 등가회로는 크게 2가지로 나뉜다. T형 결합회로와 기존 등가회로가 그것이다. T형 등가회로는 주로 공심형 변압기에 사용하는 반면, 철심형 변압기에는 사용하는 예가 드물다. 이는 철심이 있는 변압기의 경우에 T형 결합회로를 적용하면 코어의 비투 자속이 너무 높아서 철심 릴럭턴스가 너무 작아지고, 이렇게 작아진 릴럭턴스 때문에 변압기 자체의 인덕턴스 값이 너무나 커지게 되기 때문이다.

반면 보통 기존 변압기의 등가회로로 쉽게 접할 수 있는 변압기 등가회로의 파라미터들은 open-short test를 통해 얻을 수 있다.

이 방법에서는 누설 인덕턴스와 권선 저항의 값이 자화인덕턴스와 코어손실 저항에 비해 상대적으로 작은 값을 가지기 때문에, 생략되었었다. 그러나, 제안하는 유도 전력 급전/집전 장치의 경우, 공극을 통하여 발생하는 누설 자속은 여자전류를 포함한 무효전력분에 대해 고려하는 만큼 반드시 등가회로에서 고려되어야 할 부분이다. 일반적으로 변압기의 등가회로는 다음과 같은 파라미터로 나타낼 수 있다. 여기서 여자 전류를 알 수 있는 회로 (a)는 회로(c)로 바뀌어야 한다.



〈그림 4〉 유도 전력 급전/집전 장치 등가회로



<<Open test >>

$$\text{입력전력(회로(c))}: P_{oc} = VI \cos \theta \quad (1)$$

$$\text{철손저항}: (R_1 + R_c') = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \cos \theta} \rightarrow R_c = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \cos \theta} - R_1 \quad (2)$$

1차 누설 & 자화 리액턴스

$$X_{l1} + X_m' = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \sin \theta} \rightarrow X_m' = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \sin \theta} - X_{l1} \quad (3)$$

<<Short test >>

1/2차 등가 권선 저항:

$$R_{eq}' = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (4)$$

$$1/2차s임피던스: Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (5)$$

$$1/2차a리액턴스: X_{e,q}' = [Z_{sc}^2 - (R_{e,q}')^2]^{1/2} = X_{l1} + X_{l2}' \quad (6)$$

$$= 2X_{l1} = 2X_{l2}'$$

2.5 유도 전력 급전/집전 장치의 누설 리액턴스

1/2차 리액턴스를 같다고 놓은 것은 두 권선이 같은 릴럭턴스를 갖는다는 의미를 가지고 있다.

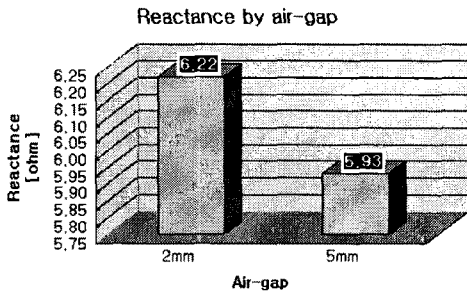
Open test에서 전체 임피던스는 아래 식과 같다.

$$Z = Z_w + Z_c = R_l + jX_{l1} + \left(\frac{R_c' \cdot jX_m'}{R_c' + jX_m'} \right) \quad (7)$$

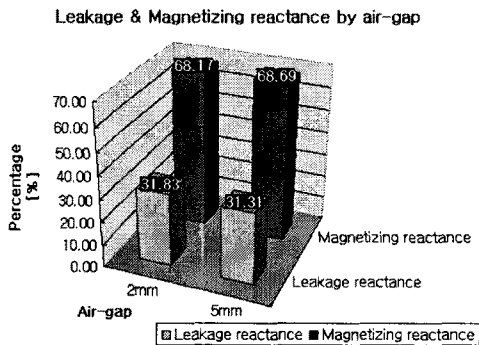
$$\text{권선임피던스: } Z_w = R_l + jX_{l1} \quad (8)$$

$$\text{철심임피던스: } Z_c = \left(\frac{R_c' \cdot jX_m'}{R_c' + jX_m'} \right) \quad (9)$$

다음 그림 (5)~(6)은 앞 절에서 설명한 open/short test를 통해 도출된 누설/자화 리액턴스의 값을 비교한 표이다. 실험은 기존의 변압기에서 실행했던 open/short test와 동일하다. 그러나 open test에서 등가회로 파라미터상 1차 누설 리액턴스와 1차 권선 저항 분을 생략하지 않고 수식을 전개하였다.



〈그림 5〉 공극에 따른 유도 전력 급전/집전 장치의 리액턴스



〈그림 6〉 공극에 따른 유도 전력 급전/집전 장치의 누설/자화 리액턴스

본 논문에서는 약 40[kHz]의 주파수를 인가한 경우를 기준으로 하여, 공극의 길이가 2[mm]에서 5[mm]로 변하는 경우, 전체 리액턴스의 크기는 감소한다. 이러한 상태에서 누설 리액턴스는 1.98[Ω]에서 1.86[Ω]로 감소하고, 자화 리액턴스는 4.24[Ω]에서 4.07[Ω]로 감소하였다. 여기서 우리가 주의할 기울여야 할 점은 각 공극에서 자화 리액턴스와 누설 리액턴스가 차지하는 비율이다. 각

공극에서 누설 리액턴스는 전체 리액턴스의 약 31[%]를 차지한다. 이러한 점으로 볼 때, 누설 리액턴스는 일반 변압기의 등가회로에서라면 충분히 우려가 되었을 과 여자전류를 제한하는 성분으로 작용하고 있다는 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 친환경적 교통시스템에 적용이 가능한 유도 전력 급전/집전 장치의 특성평가에 관하여 연구하였다. T 변환을 이용한 유도 전력 집전 장치의 변압기 모델링이 가능할 정도로 공심형 변압기에 가까운 특성을 갖지만, 변압기 등가회로에서 보통 무시하고 넘기는 Open test에서의 1차 누설 리액턴스와 1차 권선 저항 성분을 고려하여 등가회로를 다시 구성하였다. 또한 이를 통하여 기존 변압기에서 무시되는 등가회로의 1차 누설 리액턴스가 상당히 크다는 것을 알았다. 그러나 open test 시에 자화전류만 고려한 경우, 이 누설 리액턴스는 여자전류의 크기를 제한하여 주는 역할을 하므로, 유도 전력 급전/집전 장치의 무효전력량을 조절할 수 있는 중요한 파라미터로 작용한다. 이러한 특성을 고려하여 누설 및 자화 리액턴스의 비율을 결정하는 기법이 유도 급전/집전 장치의 중요 설계 기법에 포함될 것으로 여겨지며, 시스템의 급전/집전 성능을 보다 향상시킬 수 있는 장치 설계 기법으로서 유도 전력 급전/집전 장치의 공극설계 및 권선설계 등의 더욱 구체적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.Boys, G.A.Covic, and GREEN, A.W "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," IEE Proc.,Electr.Power Appl., 2000,147,(1) pp.37-43, 2000
- [2] M.Barnard, J.A. Ferreira, and J.D. van Wyk, "Sliding transformers for linear contactless power delivery," IEEE Trans., Power Electron., vol.44, pp.774-779, Dec.1997.
- [3] A.W.Kelley and W.R.Owens, "Connectorless Power Supply for an Aircraft-Passenger Entertainment Systems," IEEE Trans., Power Electron., vol.4, pp.348-354, July.1989.
- [4] Abe, H. Sakamoto, H. Harada, K. "A noncontact charger using a resonant converter with parallel capacitor of the secondary coil," IEEE Transaction on Industry Applications, vol.36,no.2, pp.444-451, March/April. 2000.