

권선형상에 따른 유도전력공급장치 특성해석

한경희*, 이병승**, 권삼영**, 박현준**, 이형우**, 백수현*,
*동국대학교 전기공학과, **한국철도기술연구원 전기신호연구본부

The analysis of IPT transformer by winding structures

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

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

Abstract - In this paper, the inductive power collector using electromagnetic induction for vehicle such as the electric railway vehicle system is suggested and some ideas for 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 mutual inductance.

This paper will study for the transfer characteristic of power from input to output and equation including mutual inductance. And also, effect of leakage inductance variation of inductive power collector according to structure of winding was considered.

1. 서 론

최근 환경 친화적인 시스템 개발 및 에너지에 대한 연구가 부각되고 있는 가운데 근래 교통시스템 분야에서도 전기자동차, 신교통시스템 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 전기계도차량용 유도 급전 시스템의 개념을 제시하고 전력 집전자의 구조에 대한 상호인덕턴스의 값을 유추하여 시스템의 전력전달 특성에 관하여 알아보고자 한다.[1]-[4]

실험과 시뮬레이션을 통하여 공극에 따른 유도 급전 시스템의 특성을 알아보았으며, 권선의 구조에 따른 인덕턴스 변화를 알아봄으로써 인버터의 부하로 작용하는 유도 급전 장치의 시스템 영향정도를 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 차량 시스템 사양

본 연구에서는 우선, 소형계도 운행 시스템 차량을 대상으로 시스템의 규모 및 사양에 대해서 알아보기로 한다. 다음 표 1은 미국, 영국, 호주에서 기술개발단계, 혹은 상용화를 눈앞에 두고 있는 각종 소형계도 시스템 차량의 급전용량 및 차량의 승차인원과 무게 등을 나타낸다.

〈표 1〉 해외 소형계도 시스템 사양

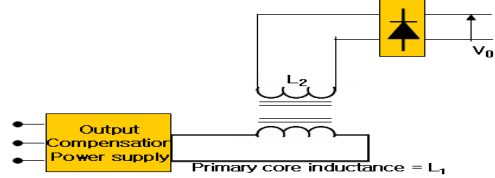
| | Taxi2000 | PRT2000 | ULTra | Austrans |
|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 개발국가 | 미국 | 미국 | 영국 | 호주 |
| 탑승정원 및 차량무게(만차) | 3명 (340kg) | 4명 (2,041kg) | 4명 (800kg) | 9명 (3,025kg) |
| 운행속도 (km/h) | 40 | 48 | 25 ~ 45 | 70 ~ 120 |
| 급전용량 (주행시:kW) |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

탑승인원이 4명이고 만차시 무게가 800kg이며, 운행속도는 평균 40km/h인 소형계도 시스템을 개발 목표로 삼을 경우, 주행 중에 요구되는 급전용량은 대략 25kW 정도로 예상할 수 있다. 그러나 표 1에서 제시된 소형계도 시스템의 급전방식은 대부분 제 3궤조 혹은 배터리 충전방식인 기존 철도시스템의 급전방식이 적용

되었다. 본 논문에서는 기존의 소형계도 차량의 급전 용량을 근거로 하여 유도 급전 시스템의 적용을 기술하기로 한다.

2.2 유도 급전 시스템

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



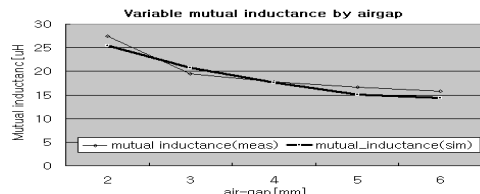
〈그림 1〉 유도 급전 시스템

계도에 매립된 1차측 전력전송부의 상면에 차량이 위치하고 이 때, 차량 하부의 2차측 집전코일에 전력이 유도된다.

2차측 전력 집전자의 최대 출력 전류는 수식 1 ~ 3에서 볼 수 있듯이 M_p/L_2 상호인덕턴스의 2차 자기 인덕턴스의 비에 의존하여 1차측 전력전송부 전류 I_{L1} 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

2.3 공극에 따른 유도 급전 시스템의 결합도 변화

아래 그림2는 실제 유도 급전 장치의 상호 인덕턴스를 측정 및 모델을 해석하여 얻은 값을 나타낸다. 공극의 길이가 증가함에 따라서 상호인덕턴스가 감소하고 있음을 알 수 있으며, 그 범위는 약 13 - 28 uH가 된다. 이 때 자기 인덕턴스의 변화량에 비해 급격히 감소하는 상호인덕턴스의 값을 통해 공극의 길이가 변화함에 따른 누설인덕턴스의 증가를 알 수 있다.



〈그림 2〉 공극에 따른 상호 인덕턴스

공극이 증가함에 누설자속의 양은 증가하고, 결합되는 자속의 양은 감소하여 M_p/L_2 의 비율은 $L_2 = L_k + \left(\frac{N_2}{N_1}\right)M_p$, $L_k \gg M_p$ 에 의해 일정하게 유지되지 않고 감소하게 된다. 따라서 일정한 출력을 가정하면, 식 (2)에 의해 1차측 에서 무효 전력분이 증가하는 것을 예상할 수 있다.

$$V_{po} = j\omega M_{tp} I_{L1} \tag{1}$$

$$I_{psc} = \frac{V_{po}}{j\omega L_2} = \frac{M_{tp}}{L_2} I_{L1} \tag{2}$$

$$P_{max} = |V_{po} I_{psc}| = \frac{\omega I_{L1}^2 M_{tp}^2 Q_c}{L_2} \tag{3}$$

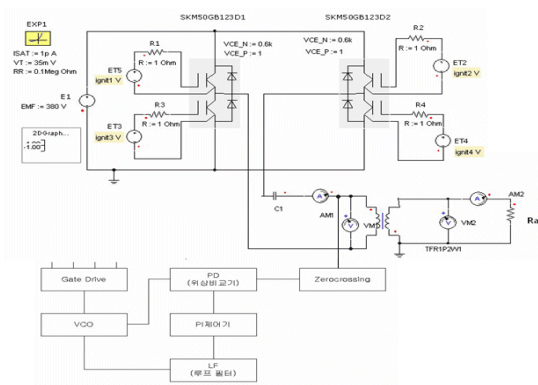
V_{po} : 집전장치 코일 개방 전압 M_{tp} : 1/2차측 코일 상호 인덕턴스
 I_{L1} : 1차 전력전송부 전류 I_{psc} : 집전장치 코일 단락전류
 L_2 : 2차 집전장치 코일 인덕턴스 w : 1차 전력전송부 전원주파수

2.4 공극변화에 따른 공급전력 해석

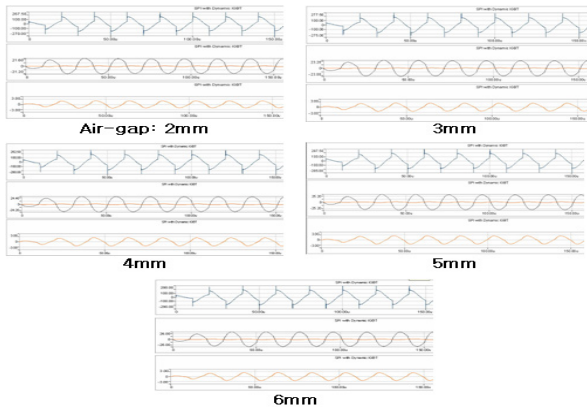
표 2와 그림 3은 앞의 2.3 절에서 언급된 무효전력의 변화를 공극에 따라 알아보고자 설계된 시스템 모델의 사양과 시스템 모델을 나타낸다. 그림 4는 공극이 2mm에서 6mm로 변화하였을 경우, 인버터에서 출력하는 전력의 증가분을 나타낸다. 인버터 출력 전류는 15 ~ 18[A]로 시뮬레이션 결과를 통해 예상할 수 있다.

〈표 2〉 유도 급전 시스템의 설계사양

| SYMBOL | SPECIFICATION | UNIT |
|-----------|-------------------|--------------|
| V_b | Primary voltage | AC 50 (V) |
| V_s | Secondary voltage | Variable(V) |
| ω | Variable | 20 (kHz) |
| M_{tp} | Variable | 13 - 28 (uH) |
| C_p | Primary capacitor | 66 (uF) |
| N_2/N_1 | Turn ratio | 1.1875 |



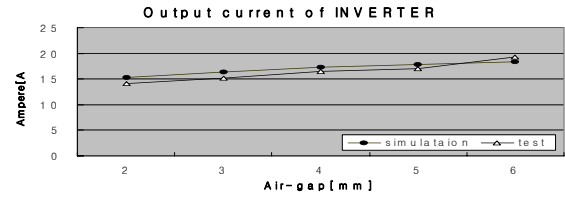
〈그림 3〉 유도 급전 시스템 시뮬레이션 모델



〈그림 4〉 유도 급전 시스템 출력전력 해석 결과

2.5 실험결과

내용을 살펴보면, 2차측 시스템 출력은 100 ~ 160[W]급의 변화를 나타내며 이때의 인버터에서 출력되는 유도 집전자의 1차측 공급 전력은 1.97 ~ 2.51[kW]의 변화폭을 보인다. 식 3에서의 공극길이의 증가에 대한 M_{tp} 의 변화율이 약 0.3배, I_{L1} 의 변화율이 약 1.4배가 되어 공극변화에 따른 식 3에서의 분자부분의 변화율은 약 0.6배로 감소되며 이 때의 시스템 총 출력은 0.625배가 되어 식 3이 올바르게 정의되었음을 알 수 있다. 그러나 인버터에서 출력되는 유도 집전자 1차측 전원의 변화는 공극이 늘어남에 따라 입력 전력이 약 1.3배 증가하여 누설 인덕턴스로 인한 무효전력분이 증가하는 것을 알 수 있다.



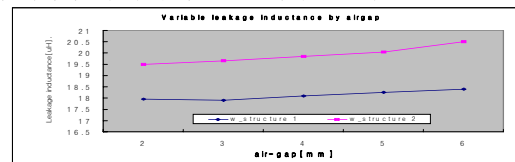
〈그림 6〉 유도 급전 시스템 인버터 출력 전류량 비교

2.6 권선구조에 대한 고찰

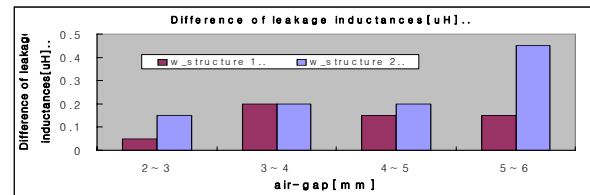
본 논문에서는 공극길이에 따라 변화하는 누설인덕턴스 값 변화에 대하여 2가지 경우의 권선 구조를 제시하여 고찰하고자 한다. 기존의 변압기에서는 1/2차간 자속의 결합도를 높이고자 1/2차간 권선의 구조를 Sandwich 로 하는 등의 시도를 하였다. 본 연구에서도 2가지 경우의 권선 구조를 제시하여 이 권선 구조에 따라 공극길이가 변화할 때의 누설 인덕턴스의 변화를 관찰함으로써 시스템 특성 개선에 보다 유리한 권선구조를 제시하고자 하였다.

그림 7에서 알 수 있듯이 w_structure1과 w_structure2는 각각 1/2차간 권선의 거리가 다른 경우이다. 각각 권선이 감긴 코어의 형상은 동일하며, w_structure1의 1/2차간 권선거리가 w_structure2의 1/2차간 권선거리에 비하여 짧다. 이에 따라 공극에 따른 누설 인덕턴스의 값의 변화정도는 w_structure2의 경우가 더 큰 것을 알 수 있다.

인버터의 부하로 작용하는 유도 급전 장치의 인덕턴스 값은 공극에 따라 변화하는 양이 작아야 한다. 그 중 누설 인덕턴스의 값의 변화량이 작아야 그 값에 따라 스위칭 주파수의 변동을 제어하는 인버터 제어시스템에 무리를 일으키지 않는다.



〈그림 7〉 권선구조에 따른 누설 인덕턴스 비교



〈그림 8〉 권선구조에 따른 누설 인덕턴스 변화량 비교

3. 결 론

본 논문에서는 공극길이에 따라 변화하는 상호인덕턴스, 누설인덕턴스 등의 파라미터 값 변화와 더불어 유도 급전 시스템의 출력특성에 대하여 분석하였다. 상호인덕턴스의 측정치와 이에 따른 시스템 출력은 특성식에 의해 계산된 출력과 일치하였으며, 공극의 증가에 따라 인버터에서 공급되는 유도 급전 장치의 1차 입력전력은 무효전력 공급량의 증가를 요구하는 시스템의 특성과 맞게 공급전력량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이후, 집전자의 형상에 대한 연구는 물론, 이상의 전력 공급 특성을 바탕으로 공극에 따른 가변주파수 추종에 관한 연구가 병행되어야 할 것으로 여겨진다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.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] J.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.