

PRT용 Cut core 공극 및 권선위치에 따른 IPT 결합계수 특성

한경희¹, 이병송², 권삼영³, 박현준⁴, 백수현⁵

¹동국대학교 전기공학과, ^{2~5}한국철도기술연구원 전기신호연구본부

Characteristic of IPT coupling factor with various air-gap and winding position for PRT

K.H.Han¹, B.S.Lee², S.Y.Kwon³, H.J.Park⁴, S.H.Baek⁵

¹Dongguk Univ. Electric Dept., ^{2~5}KRRI Signaling & Electrical Engineering Research Dept.

Abstract - The contact-less inductive power transformer (IPT) uses principle of electromagnetic induction. Generally, there were many methods to improve the transfer performance of traditional transformer. But, though the principle of IPT is similar to that of general transformer, it is impossible to apply the methods because of large air-gap. Consequently, many linear numerical formulas for analysis of performance and design of traditional transformer cannot be used in development of IPT.

The concept of the IPT for vehicle like PRT (Personal Rapid Transit) system is suggested and some suggestions for power collector(core & winding) design of IPT to improve power transfer performance are presented in this paper.

The characteristic of power delivery with these novel methods in designis presented by simulation and examination.

1. 서 론

최근 무접촉 방식의 유도 급전시스템의 활용범위가 소형가전에서 차량시스템에 이르기까지 점차 넓어지고 있다. 이는 철도 전기 차량 시스템에도 적용이 가능하다. 보통, 케도 위를 주행하는 기존의 전기철도차량은 급전선에 접촉하여 전원을 공급받는 것이 일반적이다. 그러나 용도에 따라 다양한 규모의 전기철도 시스템이 요구됨에 따라 PRT와 같이 기존철도에 비해 소규모의 전력 소비형태를 가지는 소형케도 차량의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 축소된 전력 급전(충전) 영역에서 배터리 차량을 이용함으로써 무접촉의 유도 급전 방식인 전력 공급 시스템의 구현이 가능하다. 소형케도 차량의 유도 급전(충전) 장치에는 차량의 이동을 위해 큰 공극이 요구된다.

유도 급전(충전) 장치는 유도 변압기와 동일한 원리를 가진다. 그러나 시스템에 따라 1, 2차 코어 및 권선이 다양한 규모의 공극을 가지고 물리적으로 분리되어 있으며 공극과 전원(공전)주파수에 의해 쇄교자속을 비롯한 인덕턴스, 저항 등의 변압기 임피던스의 파라미터가 여러 값을 가지고 있어서 파라미터의 계산이 기존의 인덕터나 변압기와 동일한 방식의 설계방법에 따라서는 구하기 어렵다.

전력용 전력변환회로에서 사용되는 변압기의 경우, 효율을 증가시키기 위하여 코어에서 권선에 이르기까지 다양한 설계기법을 발전시켜왔다. 그 중에서도 권선의 설계법은 1/2차 권선의 형상(권선 길이, 권선 위치 등)으로 1/2차 자속의 결합도를 높이고 누설 인덕턴스를 저감하기 위하여 다양하게 개선되어 왔다.

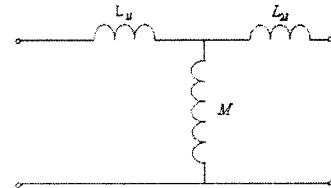


그림 1) IPT 통가회로

전력용 변압기의 권선법을 유도 급전시스템의 유도급전 장치에 적용한 사례도 있다[1-3]. 그러나 이러한 권선의 설계는 유도급전시스템의 적용 시스템에 따라 공극의 크기가 다양해짐에 따라 보다 면밀하게 검토되어야 할 필요성이 있다. 특히 이러한 연구는 1차측에 대하여 2차측의 이동거리가 물리적으로 자유로워야 할수록 더욱 필요하다.

다음 절에서는 gap의 길이에 따라 적절한 권선설계를 비롯하여 fringing effect에 영향을 최소로 받을 수 있도록 하는 유도 급전(충전) 장치의 설계를 2차원 해석과 실험을 통하여 제시하도록 한다.

2. 본 론

2.1 IPT 설계 고려사항

일반적으로 전력변환회로에서 사용되는 인덕터나 변압기는 모터와 같은 물리적 운동이 가정이 되어 있지 않다. 일반적으로 전력변환의 주 요소가 되는 자기 인덕턴스는 상호 인덕턴스와 누설 인덕턴스로 구성되며 대부분 에너지 변환을 담당하는 상호 인덕턴스의 크기가 누설 인덕턴스에 비하여 큰 값을 가지므로 주로 자기 인덕턴스의 값을 선정하고 시스템의 요구사항은 용량선정에서부터 시작한다.

그러나 IPT의 경우, 전력이 공급되는 1차와 전력을 급전 받는 2차가 물리적으로 큰 공극을 사이에 두고 완벽하게 분리되어 있어 누설 인덕턴스의 비율이 커지는 특성을 가지고 있다. 그러므로 공극의 길이에 대해 범위를 선정하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 공극의 규모가 정해져야 유도 급전 장치의 코어 형태가 결정되고, 바로 이 코어의 형태로 인해 1, 2차 측의 자속 결합도 범위가 결정하여 상호인덕턴스와 누설인덕턴스의 비율을 정하기 때문이다.

그림 (1)에서 볼 수 있는 바와 같이 누설 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 표시하면 다음과 같다.

주파수와 공극에 따라 인덕턴스의 값이 달라지기 때문에 기존의 인덕터의 설계와는 다른 방식을 갖는다.

소형 케도 열차인 PRT에 적용될 IPT의 공극은 역사에서 정지한 상태에서 충전이 이뤄지지만 1~2분간 충전이 급속히 이뤄져야 하므로 차량의 이동과 정차가 신속하게

이뤄질 수 있도록 충분한 여유를 가져야 한다. 따라서 1, 2차간 거리는 4~20[mm]로 임을 가정한다. 또한 차량의 신속한 이동에 저해 받지 않도록 공극의 변화유형은 매우 자유로워야 하므로 본 논문에서는 IPT용으로 Cut core를 선정한다. 따라서 이때의 Cut core의 공극은 8~40[mm]가 된다. 이와 같은 형상의 core를 사용하는 경우는 1/2차 간의 공극의 길이에 대한 제한치가 비교적 큰 경우로 들 수 있다. 이러한 경우는 공진컨버터의 주파수 제어 범위가 넓어져서 주파수 추적 제어 컨버터가 필수적으로 요구된다.

주파수 추적형 공진형 컨버터의 효율이 아무리 뛰어나다 할지라도 IPT 차체의 인덕턴스의 변화가 커서 추적 주파수의 범위가 너무 광범위한 경우에는 제어 알고리즘이 복잡해지고 2차 공진 전류의 검출 센서의 검출도가 높아져야 하는 등 IPT를 제외한 컨버터 시스템의 역할에 큰 비중이 가해지게 된다. 따라서 결합도는 높고 공극에 따라 임피던스의 변화량이 작은 IPT를 설계하는 것이 매우 중요하다.

2.2 FEM을 이용한 자계 계산

공극형 변압기에서 인덕턴스 및 순설 등의 계산을 위해 서는 각 부분의 자계강도 \vec{H} 및 자속밀도 \vec{B} 를 이용하여 선형화된 수식을 전개하는 것이 일반적이며 이를 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1)$$

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = NI = \int_{core} H_c dl_c + H_g l_g \quad (2)$$

$$\Phi = \iint_A \vec{B} dA = \mu_0 \mu_r H_c A_c = \mu_0 H_g A_g \quad (3)$$

코어와 공극에서의 자계 분포를 나타내면 식 (3)과 같으며, 이때 경로 l_c 를 따라 나타나는 코어의 교차 면적 A_c 가 일정한 값이라면 자계 강도는 다음과 같이 코어의 공극과 공극 단면적 등의 형상에 따른 수치에 따라 선형식으로 표현할 수 있다.

여기서 N은 권선의 턴수이고, Φ 는 자속, 첨자 c는 코어를 가리킨다. 또한 첨자 g는 공극을 나타낸다.

$$H_c = \frac{NI}{l_c + \mu_r l_g \frac{A_c}{A_g}}, \quad H_g = \mu_r \frac{A_c}{A_g} H_c \quad (4)$$

식 (1)~(4)에 걸쳐 볼 수 있듯이 이러한 방법으로 구한 해는 매우 작은 공극에서만 타당한 결과를 갖는 단점이 존재한다.

공극이 커짐에 따라서 공극 교차 면적 A_g 와 코어의 단면적 A_c 간에 큰 차이가 발생하게 된다. 이는 공극이 증가함에 따른 fringing flux 때문이다.

이러한 문제를 해석적으로 풀기 위해서는 간략화를 위한 몇 가지 가정이 필요하다. 3차원 문제를 2차원 문제로 간략화 되었다. 와전류에 의해 발생하는 코어내부의 자계 강도는 무시한다. 벡터포텐셜을 이용하는 방법이 있다. 이는 $\vec{B} = \mu \vec{H} = rot \vec{A}$ 로 정의 되는 \vec{A} 를 이용함으로써 가능하다.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} rot \vec{A} \quad (5)$$

따라서, 각 영역에 분포하는 벡터포텐셜을 분석하여 선형 근사식이 아닌 식 (5)에 의한 계의 분석이 필요하다.

벡터포텐셜 \vec{A} 의 분석을 위하여 2차원 유한요소법을 적용하였다.

2.3 FEM을 이용한 자계 계산

본 논문에서 해석 및 실험을 통한 검증 모델로 선정한 모델은 총 3가지 type이다. a type의 경우, 따라서 1, 2차간 거리는 4~20[mm]로 임을 가정한다. 또한 차량의 신속한 이동에 저해 받지 않도록 공극의 변화유형은 매우 자유로워야 하므로 본 논문에서는 IPT용으로 Cut core를 선정한다. 따라서 이때의 Cut core의 공극은 8~40[mm]가 된다. 이와 같은 형상의 core를 사용하는 경우는 1/2차 간의 공극의 길이에 대한 제한치가 비교적 큰 경우로 들 수 있다. 이러한 경우는 공진컨버터의 주파수 제어 범위가 넓어져서 주파수 추적 제어 컨버터가 필수적으로 요구된다.

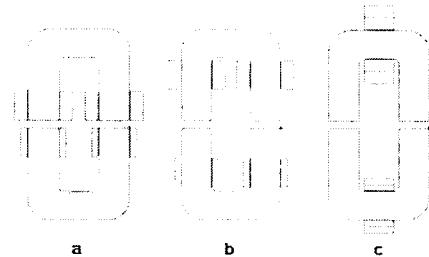


그림 2) winding position에 따른 Cut core IPT의 해석 및 실험 model

그림 2는 1/2차 권선간 거리에 따른 IPT의 해석에 사용된 모델을 나타낸다. 해석은 Ansoft EM2D를 이용하였으며, 이는 실험 모델과 동일하다. 코어의 size는 Amotech 社의 amorphous cut core "AMCU-200"을 사용하였다.

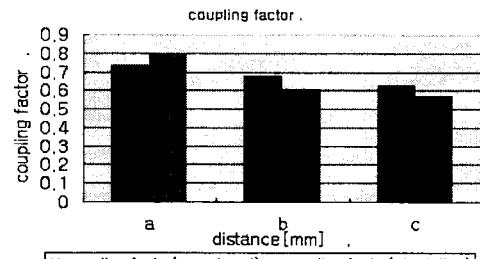


그림 3) winding position에 따른 Cut core IPT의 결합계수 (실험 및 해석 결과)

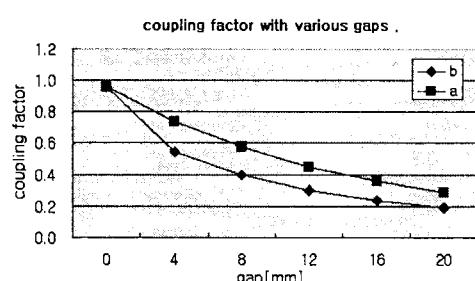
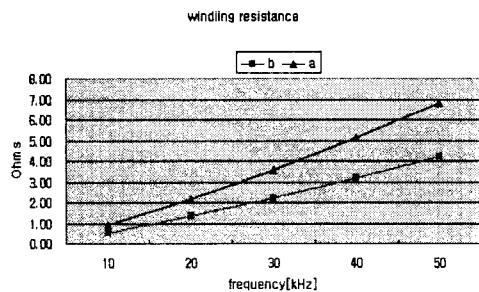


그림 4) winding position a, b type에 따른 공극별 결합계수 추이

각각은 동일한 주파수(30kHz)와 공극 4mm(총공극 길이 8mm)를 가지고 있으며 Cut core의 형상은 동일하다. 실험과 시뮬레이션으로 구한 결합계수는 그림 3과 같으며, 권선의 거리가 가까울수록 높은 결합계수인 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 권선간 거리에 따른 공극별 결합계수를 나타낸다. 이 데이터에서 공극의 길이가 변함에 따라 결합계수의 변화정도가 낮은 것이 권선간 거리가 비교적 짧은 type a의 경우임을 확인할 수 있다. 인버터의 공진주파수 제어 범위는 IPT 자체의 임피던스 변화율에 의해 결정되지만 때문에 시스템의 가격과 안정도 면에서 불리하게 작용할 수 있다. 그러므로 IPT 자체의 임피던스 변화를 줄이려면 결합도 변화량이 적은 type a의 경우가 적합하다 할 수 있다.



<그림 5> winding position a, b type에 따른 주파수별 short 저항 추이

그러나 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이, 공극 주변에 위치한 권선은 결합도는 변화율이 적어 무효 전력의 변화폭을 줄이는 대신, 근접효과에 의한 임피던스 증가에는 그리 큰 장점을 보이지 못하는 것을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 보이는 경우는 물리적 공극이 4mm에 불과하여 이 공극이 증가하면 근접효과는 감소하므로 공극의 길이가 작은 영역을 제외하면 type a의 경우가 가장 바람직한 권선 형상이라 할 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 gap의 길이에 따라 적절한 권선설계를 비롯하여 fringing effect에 의한 근접효과의 영향을 최소로 받을 수 있도록 하는 유도 금전(충전) 장치의 설계를 2차원 해석과 실험을 통하여 제시하였다.

1. 2차 권선간 거리가 비교적 짧은 경우의 결합계수가, 그렇지 않은 경우의 결합계수보다 높아 무효전력의 변화가 급격히 커지는 시스템의 부담을 줄이는데 효과적인 형상임을 확인할 수 있었다.

향후, 선형화 된 수식으로 접근이 가능하도록 하는 형상설계 파라미터 도출에 관련된 연구가 필요할 것으로 생각된다.

【참 고 문 헌】

- [1] J.T.Boys, G.A.Covic, and A.W.Green, "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," IEE Proc., Electr. Power Appl., 2000, 147,(1) pp.37-43, 2000.
- [2] C. Wang, O. H. Stielau, G.A. Covic, "Load models and their application in the design of loosely coupled inductive power transfer systems," IEEE-PES/IEE/DSEE International Conference of Power System Technology, POWERCON 2000, Perth Australia, December 4th-7th, pp. 1053-1058, 2000.
- [3] PJM, Smidt & JL Duarte, "Powering Neon lamps through piezoelectric transformers," IEEE Conference, PESC 1996, pp.310-314, 1996.