

## 보상권선이 있는 KAIST OLEV용 pickup

전성준\*, 송보윤\*\*, 신재균\*\*, 서대원\*\*, 손성준\*\*, 조동호\*\*  
부경대학교\*, 한국과학기술원\*\*

### Pickup with compensation winding for KAIST OLEV

Seong-Jeub Jeon\*, Bo Yune Song\*\*, Jae Gue Shin\*\*, Dae-Won Seo, Sung Jun Son\*\*, Dong-Ho Cho\*\*  
Pukyong National University\*, Korea Advanced Institute of Science and Technology \*\*

**Abstract** - In this paper, a new pickup with compensation winding for KAIST OLEV is proposed. The proposed compensation winding increases induced voltage at a pickup and can be used for tuning of a pickup. The detailed theoretical analysis is given. It is expected to enhance the performance of OLEV pickup,

#### 1. 서 론

내연기관 자동차는 화석연료의 고갈과 환경에 나쁜 배기가스를 배출하는 문제점을 안고 있어 전기자동차의 도입을 고려하였고 많은 연구가 이루어졌다. 지금은 시장에 도입이 시작되었다고 볼 수 있다. 그러나 전기 자동차의 핵심 중의 하나인 배터리는 아직도 에너지 밀도가 낮고 충전 인프라 및 긴 충전 시간은 여전히 해결해야 할 문제로 남아 있다. 2009년에 발표된 KAIST OLEV 시스템은 주행 중 충전을 시도하여 작은 크기의 배터리로도 장거리 운전을 할 수 있는 가능성을 열어 주었고 전기 자동차 도입에 걸림돌을 해소시켜줄 것으로 기대된다.[1,2] KAIST OLEV는 주행 중 충전을 하기 때문에 차량이 주행할 때 유지해야 할 지상고로 인해 큰 공극이 수반되어 에너지 전달에 있어서 불리한 면이 있다. 이는 pickup의 설계에 영향을 미친다. 큰 공극은 pickup의 Q(선택도: quality factor)를 높여 파라미터 변동에 너무 민감해진다. 즉, 회로 정수가 약간만 바뀌어도 출력이 크게 줄어들 수 있다. 본 연구에서는 pickup에 보상 권선을 제안하고 보상권선이 있는 pickup의 동작을 분석하여 pickup 성능의 개선을 위한 이론적 기틀을 마련하였다.

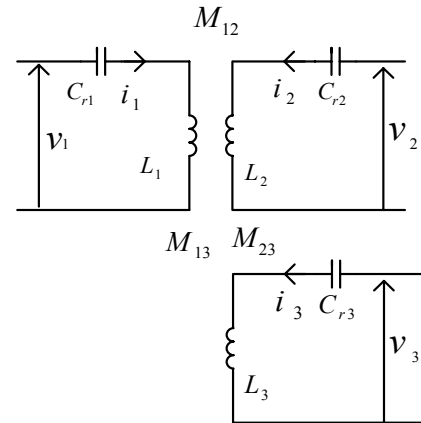
#### 2. 본 론

##### 2.1 KAIST OLEV용 pickup

KAIST OLEV의 pickup는 공간상으로 차이가 없는 전자기장 위를 미끄러져 지나가 전기-기계적 에너지 변환이 없다고 생각할 수 있어 급전선(feeder)-pickup은 하나의 변압기로 볼 수 있다. 그런데 공극이 크므로 결합계수가 매우 작다. 즉, 상호 인덕턴스가 자기 인덕턴스에 비해 매우 작다. 상호 인덕턴스는 에너지 전달에 기여한다고 볼 수 있고, 자기 인덕턴스는 에너지 전달을 방해한다고 볼 수 있다. 자기 인덕턴스의 효과를 줄이기 위하여 보상을 하여야 한다. 자기 인덕턴스를 완전히 제거하면 완전 보상하였다고 할 수 있고, 공진회로가 구성된다. KAIST OLEV에서는 1차 측은 일정 전류 제어를 손쉽게 하기 위하여 약간 부족 보상을 하고 2차 측은 완전 보상을 한다. 2차 측인 pickup에서 자기 인덕턴스가 크게 설계되어 있어 2차 측의 Q가 매우 높아 2차 측에서의 파라미터에 대한 민감도가 높아 개선하거나 미세 조정을 위한 장치를 마련할 필요가 있다. 이를 위해 보상권선을 제안하였는데 보상권선은 부하와는 별도로 조절할 수 있는 여지가 있으므로 여러 가지 방법을 적용할 수 있다.

##### 2.2 보상권선이 있는 pickup

전기 기기 특히 동기기에서 부하의 역률이, 보다 구체적으로 전류가, 기전력을 발생시키는 자속에 영향을 미친다는 것이 일찍부터 알려져 있다.[3] 이를 전기가 반작용이라 부르고, 진상 부하의 경우 전압을 유지시킨 자속과 동일한 방향의 자속을 증가시키는 효과가 있고 이를 증작용이라 부른다. 지상 부하의 경우 전압을 유지시킨 자속과 반대 방향의 자속을 발생시키는 효과가 있고 이를 감작용이라 부른다. 그래서 새로운 설계에서는 제 3의 권선(보상 권선)을 설치하고 여기에 capacitor를 부하로 두었다. 이 capacitor의 크기로 pickup에 필요한 조정을 시도하려고 한다. 그림 1은 새로이 설계한 pickup을 고려한 feeder-pickup의 등가 회로이다. feeder 측에는 첩자 1을 변수 및 파라미터에 사용하였고, 출력을 얻기 위한 2차에는 첩자 2를 사용하였고, 보상을 위한 보상권선에는 첩자 3을 사용하였다.



〈그림 1〉 제안한 pickup의 등가 회로

각 권선의 단자 전압은 식 (1)과 같이 주어진다. 자기 인덕턴스 ( $L_1, L_2, L_3$ )가 포함된 항은 전력 전달을 방해하고 제거되어야 하는 항이다. 직렬 캐패시터는 자기인덕턴스가 포함된 항의 효과를 상쇄시키거나 줄이기 위하여 삽입되었다.

$$v_1 = \frac{1}{C_{r1}} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} \quad (1a)$$

$$v_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_{r2}} \int i_2 dt + M_{23} \frac{di_3}{dt} \quad (1b)$$

$$v_3 = M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_{r3}} \int i_3 dt \quad (1c)$$

feeder-pickup 시스템은 아주 큰 인덕턴스를 가지고 있고 공진 점이나 그 근처에서 동작할 것이므로 전류는 정현파에 매우 근접한다. 정현파 동작을 가정하면 식 (1)은 식 (2)과 같이 phasor를 사용하여 표현할 수 있다.[4]  $\omega$ 는 전기각 주파수 이다.

$$V_1 = \frac{1}{j\omega C_{r1}} I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 + j\omega M_{13} I_3 \quad (2a)$$

$$V_2 = j\omega M_{12} I_1 + j\omega L_2 I_2 + \frac{1}{j\omega C_{r2}} I_2 + j\omega M_{23} I_3 \quad (2b)$$

$$V_3 = j\omega M_{13} I_1 + j\omega M_{23} I_2 + j\omega L_3 I_3 + \frac{1}{j\omega C_{r3}} I_3 \quad (2c)$$

이와 같이 정현파 동작을 가정하면 인덕턴스와 캐패시터스에 의해 나타나는 항은 부호가 반대가 되어 상쇄될 가능성이 있게 된다. 보상권선에서는 단락되어 있으므로 단자 전압이 영이다. (2c)에서  $I_3$ 을 구하여 (2a), (2b)에 넣어 (3)을 얻는다.

$$\mathbf{V}_1 = \frac{1}{j\omega C_{r1}}\mathbf{I}_1 + j\omega(L_1 + \omega^2 M_{13}^2 C_e)\mathbf{I}_1 + j\omega(M_{12} + \omega^2 M_{23} M_{13} C_e)\mathbf{I}_2 \quad (3a)$$

$$\mathbf{V}_2 = j\omega(M_{12} + \omega^2 M_{13} M_{23} C_e)\mathbf{I}_1 + j\omega(L_2 + \omega^2 M_{23}^2 C_e - \frac{1}{\omega^2 C_{r2}})\mathbf{I}_2 \quad (3b)$$

여기서  $C_e$ 는 다음 식을 만족시키는 값으로 정의 되었다.

$$\frac{1}{\omega C_e} = \frac{1}{\omega C_{r3}} - \omega L_3 \quad (3c)$$

$\mathbf{V}_1$ 에서는  $\mathbf{I}_1$ 과 관련된 항이 영이 되도록,  $\mathbf{V}_2$ 에서는  $\mathbf{I}_2$ 와 관련된 항이 영이 되도록 보상하면 이것을 완전 보상이라 한다. KAIST OLEV에서는 1차 측(feeder)은 부족 보상이 되도록 한다. 1차 측은 부족 보상, 2차 측은 완전 보상을 한 경우 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{V}_1 = j\omega L_e \mathbf{I}_1 + j\omega M_{e12} \mathbf{I}_2 \quad (4a)$$

$$\mathbf{V}_2 = j\omega M_{e12} \mathbf{I}_1 \quad (4b)$$

여기서

$$L_e = (L_1 + \omega^2 M_{13}^2 C_e) - \frac{1}{\omega^2 C_{r1}} \quad (4c)$$

$$M_{e12} = M_{12} + \omega^2 M_{23} M_{13} C_e$$

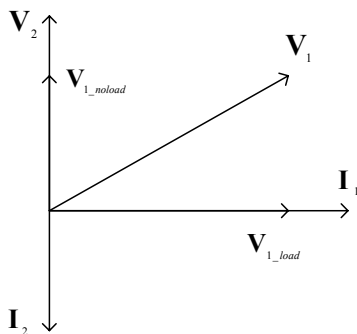
$M_{e12}$ 는 에너지 전달과 관련된 것으로 클수록 유리하다. 그러므로 제 3권 선에서 보상 후 회로는 용량성이 되어야 함을 알 수 있다. (3b)에는 2차가 완전 보상이 되도록 다음의 조건을 적용하였다.

$$0 = L_2 + \omega^2 M_{23}^2 C_e - \frac{1}{\omega^2 C_{r2}} \quad (5)$$

2차 측이 완전보상이 되는 조건을 보면  $C_e$ 가 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이는  $C_e$ 로서 다른 파라미터의 변동을 보상할 수 있음을 의미한다.  $L_e$ 의 크기로 보상을 3가지로 나눌 수 있다.  $L_e$ 가 영이면 완전 보상,  $L_e$ 가 양의 값이면 부족보상,  $L_e$ 가 음수면 과보상이다. (4a)를 다시 쓰면

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_1 - j\omega M_{e12} \mathbf{I}_2}{j\omega L_e} \quad (6)$$

$\mathbf{I}_1$ 은  $\mathbf{V}_1$ 을 조절하여 제어할 수 있다. 이때  $\mathbf{I}_2$ 는 외란으로 취급된다. 이와 같이 부족보상인 경우에는 1차 전류를 제어하기가 쉽고 이를 통하여 전력을 제어할 수 있으며 또한 전류가 전압보다 위상이 늦어져 전력변환기는 soft-switching 동작을 하여 스위칭 손실을 최소화 한다. KAIST OLEV에서는  $\mathbf{I}_1$ 이 일정하도록 제어하고 있다. 그림 2는 1차를 부족 보상으로 하였을 경우의 phasor 선도이다.



<그림 2> 1차 부족 보상시의 phasor도

여기서  $\mathbf{I}_1$ 이 기준 벡터이다. 먼저  $\mathbf{I}_1$ 에 의해  $\mathbf{V}_{1\_noload}$ 은 다음과 같이  $\mathbf{V}_2$ 는 식 (4b)와 같이 유기된다. 이들은  $\mathbf{I}_1$ 보다 위상이 90도 앞선다.

$$\mathbf{V}_{1\_noload} = j\omega L_e \mathbf{I}_1 \quad (7)$$

2차의 부하가 순저항성이면 부하 전류  $\mathbf{I}_2$ 는  $-\mathbf{V}_2$ 와 동상이 된다. 이 부하 전류에 의해 1차에  $\mathbf{V}_{1\_load}$ 이 다음과 같이 유기된다.

$$\mathbf{V}_{1\_load} = j\omega M_{e12} \mathbf{I}_2 \quad (8)$$

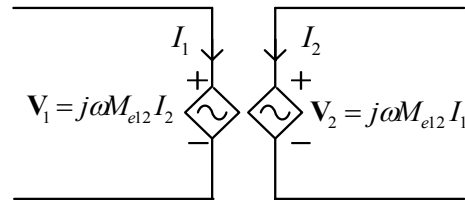
$\mathbf{V}_{1\_noload}$ 과  $\mathbf{V}_{1\_load}$ 의 합이 (4a)와 같이 1차 단자 전압을 형성한다.  $\mathbf{V}_{1\_load}$ 와  $\mathbf{I}_1$ 은 전력을 만든다. 이 전력은 부하가 요구할 때 1차에서 받아 2차로 전달한다. 전력의 관계는 다음 절에서 설명하였다.

### 2.2 완전 보상과 전력 전달

1차도 완전 보상하는 경우 (4)에서  $L_e$ 를 영으로 두면 1차 전압은 식 (8)의 부하 전압과 동일한 다음의 관계식을 얻는다.

$$\mathbf{V}_1 = j\omega M_{e12} \mathbf{I}_2 \quad (9)$$

이식은 (4b)와 함께 완전 보상 시의 전력 전달을 보여준다. 그림 3은 이 경우의 회로 모델이다. 전력 전달이 단순하게 전류제어 전압원에 의해 표현된다. 전력은 아무런 방해물 받지 않고 전원에서 부하로 전달됨을 보여준다. 이 논문에서 선의 저항을 무시하고 이론을 전개하였는데 실제에는 권선의 저항이 전력 전달을 제한하게 된다.



<그림 3> 완전 보상 후의 등가 회로

완전 보상 후의 1차 측으로 흘러들어오는 전력은

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{V}_1 \mathbf{I}_1^*\} \quad (10a)$$

2차 측으로 흘러들어오는 전력은

$$P_2 = \text{Re}\{\mathbf{V}_2 \mathbf{I}_2^*\} = \text{Re}\{j\omega M_{e12} \mathbf{I}_1 \left(\frac{\mathbf{V}_1}{j\omega M_{e12}}\right)^*\} = -\text{Re}\{\mathbf{V}_1 \mathbf{I}_1^*\} \quad (10b)$$

$P_2$ 는  $-P_1$ 이 되어 외부에서 흘러들어오는 전력이 영임을 알 수 있다. 이는 이상적인 변압기의 경우와 같다. 이는 선로 저항을 무시한 경우이고 실제로는 권선의 작은 저항에서 소모되는 전력이 존재하고 이 저항에 의해 전력전달은 제한된다.

### 3. 결 론

본 논문을 통하여 보상 권선이 있는 pickup을 제안하고 이 pickup을 사용하는 feeder-pickup 시스템의 이론적 해석을 하였다. 보상권선에 진상전류를 흘려 2차전압을 상승시키는 역할을 함과 동시에 공진을 정확히 유지하도록 튜닝을 하는 목적으로 사용할 수 있음을 보였다. 향후 KAIST OLEV 시스템의 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

[1] N.P. Suh, D.H. Cho, C.T. Rim, "Design of On-Line Electric Vehicle", Proceeding of 20th CIRP Design Conference, pp. 3-8, 2010  
 [2] 정구호 외, "온라인 전기자동차를 위한 비접촉 유도 전력 전달 시스템", 2010 대한전기학회 하계 학술대회 논문지, pp.1054-1055, 2010  
 [3] M.S. Sarma, Electric Machines, West Publishing Company, New York, 1994  
 [4] 이동수, 전성준, 정구호, 조동호, "부하의 세그먼트이션이 고려된 공진형 컨버터", 2010 전력전자 학술대회 논문지, pp.230-231, 2010