

전기자동차용 2중 회전자형 구동시스템에 관한 연구

°김정홍*, 문제원*, 정태욱*, 안진우**, 팡영문*
*부산대학교, **경성대학교

Study on Driving System for Electric Vehicle

°Jung-Hong Kim*, Jae-Won Moon*, Tae-Uk Jung*, Jin-Woo Ahn**, Young-Moon Hwang*
* Pusan National University, ** Kyung Sung National University

Abstract - In order to achieve a essential requirement for the driving system of electric vehicles, that is, starting pick-up ability, a wound-type induction motor with double-rotor structure is proposed. Slip Power Recovery system is adopted to improve the efficiency in the low speed range and to control speed of this system. Theoretical analysis and experimental results from 300[W] prototype motor is presented to verify the improvement of pick-up ability and high-efficiency driving characteristics through the wide speed range, especially under the low speed range.

기동시키면 외측회전자가 정상운전속도로 구동하게 된다. 이러한 상태에서 외측회전자의 회전자속을 제동장치로 제동하여 운동을 개시하면 전기자와 여자축의 자기적 결합상태가 정상 상태이므로 기동시의 고조파 토크에 의한 기동특성의 저하가 보상되어 기동특성이 개선될 것이다. 저속도에서의 효율개선을 위해 슬립전력회수방식을 적용함으로써 넓은 범위에서의 가변 토크-속도 특성과 고효율 특성을 갖게 한다.

그림 1은 2중 회전자형 구동시스템의 구성도이다.

1. 서론

자동차 문화의 급속한 보급에 따라 가솔린 엔진자동차의 배기가스 및 소음에 의한 환경공해가 사회적 문제로 되고 있으며 이에 대처하는 한가지 방법으로 전기자동차 보급의 필요성이 대두되고 있다. 전기자동차가 환경성과 효율면에서 가솔린 자동차에 비하여 우수하면서도 실용화가 쉽게 이루어지지 않는 요인은 (1) 에너지원인 전지의 수명이 짧고 (2) 축전에너지 밀도가 낮아 소요적재중량이 크며 (3) 동력시스템의 성능면에서는 순발가속력, 동판능력 및 고속구동능력(100km/h진후)의 성능이 부족하다는 점이다

본 연구에서는 이러한 취약점중 순발가속능력의 향상을 위해 전기자축과 여자축을 모두 회전자형으로 한 2중 회전자형 전동시스템을 제안한다. 또한, 구동시스템의 제어성능과 저속도 범위에서의 낮은 효율을 개선하기 위해 2중 회전자형 전동기에서 구동에너지를 회수와 양회전체 철심의 상호인덕턴스의 작용을 향상시키는 방법으로서 슬립전력회수시스템(slip power recovery system)을 적용하고자 한다.

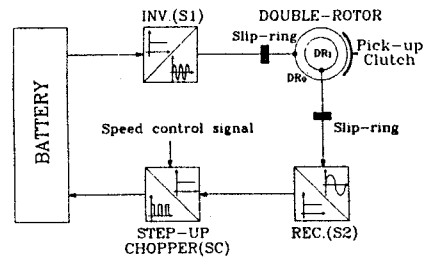


그림 1. 2중 회전자형 구동시스템의 구성도

내·외측회전자의 전기적 결선을 위해 3상 슬립링이 각각 부착되어 있으며, 외측회전자를 제동하여 내측회전자를 순발 가속시키기 위한 전자클러치를 장착한다. S1은 직류전원을 일 정주파수의 전원으로 변환시켜 외측회전자에 공급하는 인버터로서 시스템을 단순화하기 위해 CVCF형을 채택하였다. 콘버터부는 정류기 S2와 승압효피(step-up chopper) SC로 구성되며 내측회전자의 권선에 2차 슬립주파수의 여자전압을 인가하기 위한 변환기이다. 내측회전자의 슬립전력은 직류전원축으로 회수되고 정류기 S2의 출력전압을 승압효피에 의해 제어한다. 토크-속도제어는 승압효피에 의하여 슬립전력의 회수량을 조정함으로써 행해진다.

3. 2중 회전자형 구동시스템의 특성해석

3.1 순발가속(pick-up)특성과 강인성(robustness)

전동기의 토크특성은 일반적으로 속도함수로 되어 있다.

2. 전기자동차용 2중 회전자형 구동시스템

전동기를 2중 회전자형으로 할 경우 무부하 상태에서 예비

전동토크 $T_E(\omega)$ 와 부하토크 $T_L(\omega)$ 간의 동특성 관계는 식 (1)과 같다.

$$T_E = T_L(\omega) + J_M \frac{d\omega}{dt} + D_M(\omega) \quad (1)$$

여기서, J_M : 관성계수, D_M : 마찰손계수

식 (1)에서 D_M 의 값을 작다고 가정하여 무시하면 ω_1 에서 ω_2 까지의 가속시간은 t_p 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$t_p = J_M \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{T_E(\omega) - T_L(\omega)} \quad (2)$$

그러나 기동가속시의 속용성 측면에서 가속특성은 전동토크와 부하토크의 차이 $[T_E - T_L]$ 보다는 전동력의 강인성(robustness)에 주안점을 두고 해석해야 하며 전동력의 평형점에서의 상관관계는 식 (1)에 의해 다음과 같이 유도된다.

$$J_M \frac{d(\Delta\omega)}{dt} + \left[\frac{dT_L}{d\omega} - \frac{dT_E}{d\omega} \right] \Delta\omega = 0 \quad (3)$$

속도의 변동치 $\Delta\omega$ 는 식 (3)을 선형화 하여 구하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\Delta\omega = (\Delta\omega_0) e^{-\frac{1}{J_M} \left(\frac{dT_L}{d\omega} - \frac{dT_E}{d\omega} \right) t} \quad (4)$$

여기서 $\Delta\omega_0$ 는 전동기와 부하간의 속도변화의 초기치이다.

$K_{RB} = \left[\frac{dT_L}{d\omega} - \frac{dT_E}{d\omega} \right]$ 를 강인성평가계수로 정의하고 강인성 평가의 기준으로 삼는다. 전동시스템의 순발가속특성은 강인성평가계수의 값이 클수록 우수하다. 그러므로, 전동시스템을 2중 회전자형으로 하면 기동시 토크-속도특성점은 고조파토크의 영향이 억제되는 강인성이 강한 정상상태 운전점에 있게 됨으로 순발가속특성을 향상시킬 수 있게 된다.

3.2 토크-속도특성 및 효율특성

2중 회전자형 구동시스템에서 외측회전자를 전자클러치에 의해 제동하여 속도제어를 하면 제동장치에서의 손실로 인해 저속도범위에서 효율이 급격히 떨어지게 된다. 이의 개선책으로 2중회전자형 구동시스템의 순발가속특성의 개선은 외측회전자의 제동조정에 의해 행하고 속도조정은 내측회전자의 2차 전력을 제어하여 전원으로 회수함으로써 고효율운전을 하게 함이 바람직하다.

유도기의 동기회전 기준좌표계(synchronously rotating reference frame)로 변환된 행렬에서 내측회전자 여자기전력을 V_{qr}^* 로 하는 전동시스템의 정상상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^* \\ V_{dr}^* \\ (1-K_d)V_{ms} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & X_m & 0 \\ -X_m & r_r & -X_M \\ 0 & sX_M & r_r \\ sX_M & 0 & -sX_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qr}^* \\ I_{dr}^* \\ I_{sr}^* \\ I_{sr}^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, V_{qr}^* , I_{qr}^* : 외측회전자 횡축 전압, 전류

V_{dr}^* , I_{dr}^* : 외측회전자 직축 전압, 전류

V_{sr}^* , I_{sr}^* : 내측회전자 횡축 전압, 전류

V_{ms} : 외측회전자 상전압 최대치

r_s, X_m : 외측회전자 상당 저항, 자기 리액턴스

r_r', X_{rr}' : 외측회전자로 환산된 내측회전자 상당 저항, 자기 리액턴스

X_M, K_d, s : 자화 리액턴스, 승압효피계수, 슬립

진자적 토크 T_E 는

$$T_E = -X_M \cdot I_{dr}^* \cdot I_{qr}^* \quad (6)$$

가 되고 승압효피계수 K_d 와 여자기전력 V_{qr}^* 와의 상관관계는 그림 2와 같다.

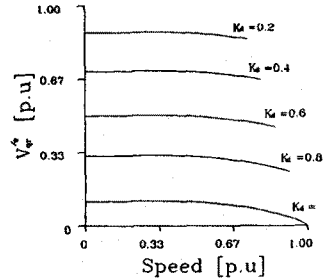


그림 2. 승압효피계수, K_d 에 따른 V_{qr}^* 와 회전속도와의 관계

K_d 는 2차전력회수와 관련된 값으로 그림 2에서와 같이 K_d 를 적절히 조정함으로써 토크-속도특성을 제어할 수 있다. 그림 3은 승압효피계수를 조정하여 슬립전력을 전원으로 반환시켜 속도제어를 할 때의 속도-토크특성이다.

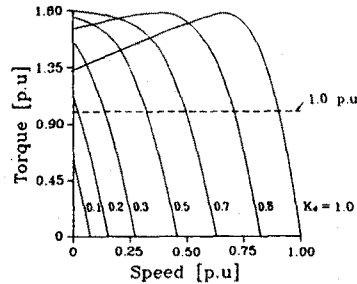


그림 3. 제한한 슬립전력제어시스템의 토크-속도특성곡선

승압효피계수를 조정하면 속도-토크 특성이 고속도 영역에서 저속도 영역으로 평행하게 편위하게 되어 저속도에서도 강한 토크특성을 얻을 수 있다. 그러므로 슬립전력회수작용에 의해 속도제어를 하면 제동행정과 순발가속행정이 잦은 운전조건하에서도 고효율 운전이 가능하다.

3.3 승압형 초퍼의 동특특성

전동기의 속도-토크 제어는 직류전원측으로 회수되는 내측회전자의 슬립전력을 제어함으로써 이루어진다. 슬립전력회수는 승압형 초퍼에 의해 이루어지며 적절한 인덕터의 용량선정과 아울러 승압효피계수(duty ratio)의 조절에 전원측 전압을 극복하도록 하여야 한다. 인덕터의 인덕턴스값은 회수된 전력량을 고려하면 다음 관계식에 의하여 결정된다.

$$L = \frac{V_s^2 T_s K_d^2}{2P} \quad (7)$$

여기서 V_s : 초퍼 입력 직류전압, T_s : 스위칭 주기

K_d : 승압효율계수, P : 회수될 전력

식 (7)은 손실을 무시한 경우이나 실제로는 철심에서의 손실과 스위칭 손실 등으로 인해 회수전력이 식 (7)의 값보다는 작아진다. 그림 4는 승압효율계수에 따른 승압형 쇼퍼의 평균 출력전압을 나타낸 것이다.

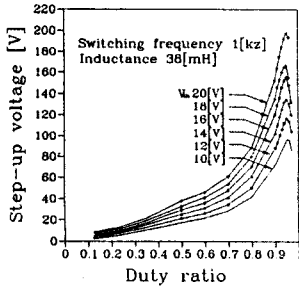


그림 4. 승압형 쇼퍼의 동작특성

그림 4에서 알 수 있듯이 쇼퍼 손실로 인해 승압효율계수가 증가하여도 출력전압이 더 이상 증가하지 않고 오히려 감소하는 특성을 나타낸다. 그러므로, 전동기의 연속적 운전을 위해서는 외측회전자에서의 슬립전력이 전원으로 계속 회수될 수 있도록 인덕터의 인덕턴스값과 듀티비(duty ratio)를 조절하여야 한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험장치의 구성

본 연구의 Model Car는 4인용 승용차로 한다. 대상 Model Car의 구동전동기 사양과 시작전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 대상전기자동차 구동전동기의 사양

	Drive motor of Model Car	Prototype
Type	Double rotor type wound type induction motor	
Output	Rated output 20 kw	300 w
	Rated torque 20 kg · m	10 g · m
Voltage	Rated voltage 120 VDC	120 VDC
Current	Rated current 200 A	3 A
Poles	6	4
Speed	Rated rpm 1000	1500

그림 5는 본 연구에서 실험한 시작전동기의 상세도이다.

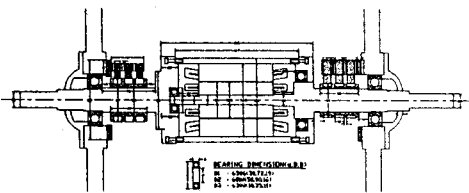


그림 5. 시작전동기의 상세도

외측회전자에 저장된 에너지를 이용하여 가속특성이 향상되

는 것을 확인하기 위하여 그림 1과 같이 2중 회전자형 전동기, 슬립전력 회수제어기, 부하등으로 실험장치를 구성하였다.

4.2 특성해석 및 고찰

권선형 유도기의 정상기동특성과 2중 회전자형 전동기의 기동특성을 그림 6에 나타내었다.

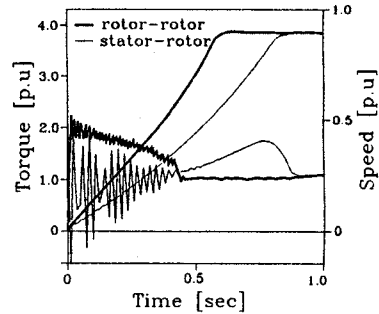


그림 6. 2중 회전자형 전동기의 기동특성

그림 6에서 알 수 있듯이 구동전동기를 2중 회전자로 하고 토크특성이 강한 운전점에서 외측회전자를 재동하여 기동하면 고조파 토크의 영향이 감소하고 외측회전자의 관성에너지가 순발가속에 기여함으로써 기동시간이 짧아지게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 기동시 가속시간특성이 외측회전자의 관성에너지로 인해 향상됨을 이론적 실험적으로 확인하였으며 효과적인 구동특성을 갖기 위해선 저속도 및 고속도 범위에서도 강인성(robustness)이 강하고 고효율 특성을 갖는 슬립전력회수시스템(slip power recovery system)을 속도-토크제어시스템으로 채택함이 타당함을 검토하였다.

참고 문헌

- [1] W. Shepherd and J. Stanway, "Slip power Recovery in Induction Motor by use of Thyristor Inverter," IEEE Trans. IGA-5, pp. 74-82, 1969.
- [2] D. H. Kelly, "Double-Rotor Induction Motor," IEEE Trans. Vol. PAS-88, pp. 1086-1092, July 1969.
- [3] T. Yokoyama, A. Kawamura, "Characteristics of ADTR-Motor for Electric Vehicle Drive," JIEE NC Record-IAS, pp. 107-110, 1993.