

높은 에너지 회수를 위한 전기자동차용 PMSM 전압제어

정성철*, 이익선*, 고종선*
단국대학교 전자전기공학부*

PMSM Voltage Control of Electric Vehicles for High Energy Recovery

Jung sung chul*, Lee ik sun*, Ko jong sun*
Department of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University*

ABSTRACT

본 논문에서는 에너지 회수를 최대화하기 위하여 전기자동차의 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Machine)으로부터 발생된 전압을 제어하는 방법을 다룰 것이다. 이 방법은 PMSM의 제동에너지를 전기에너지로 회생하기 위해 L C 공진 회로를 구성하고 배터리에 많이 충전할 수 있도록 전압을 제어한다. 일반적인 전기자동차의 경우 회생된 큰 전압이 배터리에 들어가 망가지는 현상을 방지하기 위해 스위칭 소자를 사용하여 회로를 끊어주어서 그 큰 전압을 사용하지 못한다. 이러한 회생된 큰 전압으로 제어하여 사용함으로써, 에너지 회수율이 증가하고 전기자동차의 주행거리가 증가할 수 있다. L C 공진 회로에서 FET 게이트에 전압을 인가하는 제어기의 구동 펄스에 따른 전압 변화를 분석하였다. 전압은 듀티에 따라 변해 PI 제어기를 통한 듀티 제어를 하는 전압제어 알고리즘을 연구하였다. 그리고 이를 Matlab Simulink를 이용하여 모의실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

최근 주요국에서는 자동차 연료 소비 규제 및 CO₂ 배출 허용 기준을 강화하면서 친환경 자동차에 대한 연구와 생산을 추진하고 있다. 자동차 산업의 키워드는 ‘친환경적’이고 ‘연료 효율성’이라는 점에 주목해야 한다. 현재 환경 친화적인 차량의 종류는 하이브리드 전기자동차(HEV), 플러그 인 하이브리드 전기자동차(PHEV), 순수 전기자동차(EV), 수소연료 전지 자동차가 있으며, 이러한 차량에 대한 수요는 꾸준히 증가하고 있다.^[1] 하지만 현재 전기자동차의 에너지 회수 기술이 미비하고 초기 상태이다. 전기자동차는 다른 친환경 자동차에 비해 주행할 수 있는 거리가 짧은다는 문제점을 가지고 있다.

전기자동차의 주 모터인 PMSM은 내리막길을 주행할 때 또는 감속할 때 타력으로 회전하므로 기계에너지를 전기에너지로 변환해주는 발전기로 동작을 하여 전압을 생성한다.^[2] 마찰 브레이크 또는 저항을 이용한 다이내믹 브레이크의 경우 운동에너지를 열에너지로 변환시키는 방법이다. 이러한 방법은 자동차의 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 회수한 에너지를 열에너지

로 소비하므로 효율이 상대적으로 낮다. 전기 자동차의 PMSM에 의해 발생된 전압을 배터리에 저장하기 용이한 전압으로 제어하면 사용하는 시간이 늘어난다. 이는 곧 에너지 회수율을 증가시키므로 주행거리를 늘릴 수 있다. 이 전압은 L C 공진 회로를 사용하여 저속에서도 높은 전압으로 끌어 올릴 수 있고, FET에 인가되는 게이트 전압의 듀티를 변화시킴으로써 L C 공진회로의 공진율이 조정되므로 전압을 제어할 수 있다. 이 공진에 의해 발생된 전압은 배터리 충전에 사용되며 동시에 제동력이 얻어짐으로써 풋 브레이크의 온도 상승을 억제하여 제동 안정성을 높이고 잦은 제동으로 인해 발생할 수 있는 브레이크 파열 및 페이드 현상을 방지한다.^[3]

본 논문에서는 전기자동차의 PMSM에서 에너지 회수를 용이하게 하고 배터리를 충전하기 위해 L C 공진회로를 구성하여 전압 제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 알고리즘은 기준 전압과 피드백 되는 전압의 차이에 따라 PI 제어기를 통해 듀티 제어한다. 제안된 시스템은 매트랩 시뮬링크를 통해 모의 실험하였다.

2. 전기자동차의 에너지 회수

2.1 전기자동차 구조 및

L-C 공진회로를 이용한 에너지 회수 시스템

내연기관 차량의 구동력은 엔진에서 나오지만, 전기자동차는 전동기에 의해서만 구동된다.^[4]

그림 1은 인버터, 전기자동차 클러스터, 배터리 관리 시스템(BMS), PMSM 및 배터리로 구성된 일반적인 전기자동차이다.^[1] 다른 부품도 있지만 전기자동차는 일반 내연기관을 사용하는 자동차보다 작고 단순하다. 그러나 잦은 충전이 필요하고 주행거리가 짧은다는 단점이 있다. 각 구성 부품의 기능을 살펴보면, PMSM의 경우 배터리의 전기 에너지를 사용하여 인버터를 통해 3상전류를 공급받아 구동력을 발생시켜 회전한다. 배터리는 전기자동차의 주행거리를 위한 전기 에너지 저장 및 공급을 하는 주요 구성 부품이다. 인버터는 고전압 배터리 DC전원을 AC로 변환하여 모터를 제어하는 장치이다. 마지막으로 BMS는 전기자동차의 배터리를 효율적으로 관리하고 제어하는 장치이다.

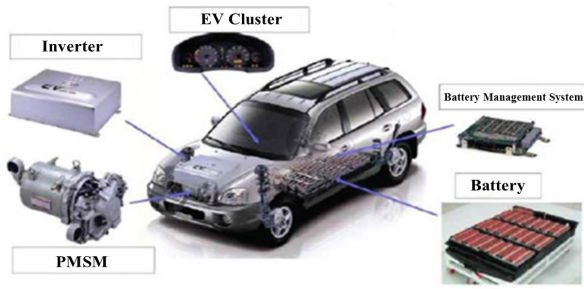


그림 1 전기자동차의 구조 및 주요 부품
fig. 1 Structure and main parts of electric vehicle

아래 그림 2는 전기자동차의 감속에 따라 제동할 때 PMSM에서 재생된 전기에너지를 배터리에 적절한 전압으로 제어하여 에너지를 회수함으로써 에너지 효율의 향상할 수 있다.

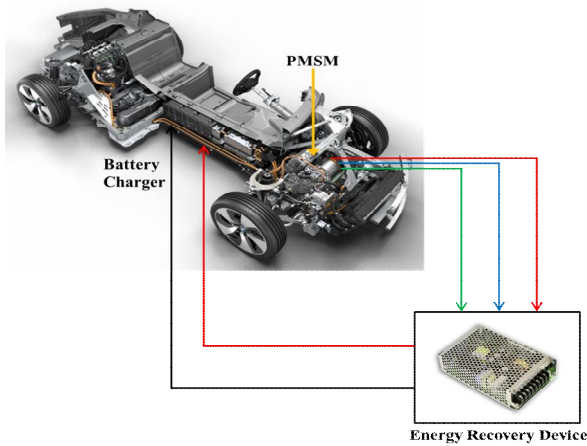


그림 2 전기자동차의 에너지 회수 개념도
fig. 2 Energy recovery concept of electric vehicle

그림 3은 에너지 회수를 위한 제어된 시스템의 개략도이다. LC 공진회로와 FET로 구성되어 저속에서도 전압을 끌어 올릴 수 있다. 제어 신호는 DSP와 같은 제어 보드를 사용하여 생성한다. 이 제어 신호는 게이트 드라이버를 통과한 후 FET의 게이트에 전압을 인가하여 공진 제어를 수행하고 이 전압은 3상 AC / DC 변환기를 통해 정류된다. 그 후에는 BMS 및 DC / DC 변환기 등을 통해 배터리에 충전된다.^[3] 하지만 그림 3에서는 간단히 저항과 커패시터로 표현되어 있다.

즉, 공진 제어는 FET를 스위칭함으로써 연결된 회로를 변경시킨다. 이로써 커패시터를 통한 무효 전력 공급 및 공진율을 조절하고 다른 주파수의 간섭으로 인한 전압변화를 제어한다. PMSM에서 생성된 전압의 주파수는 전기자동차의 속도에 따라 달라진다.^[5] 따라서 공진회로를 설계할 때, 전기자동차의 주 속도에 따른 전압 주파수로 계산되는데 이 주파수는 '속도 주파수(f_e)'로 정의한다. 인덕턴스 및 커패시턴스 값을 조정하여 속도 주파수가 '공진 주파수(f_{res})'로 조정된다. 이에 따라, LC 공진회로에서 최대 전압을 발생시킬 수 있다. 그림 4는

상기 설명의 그래프이다.

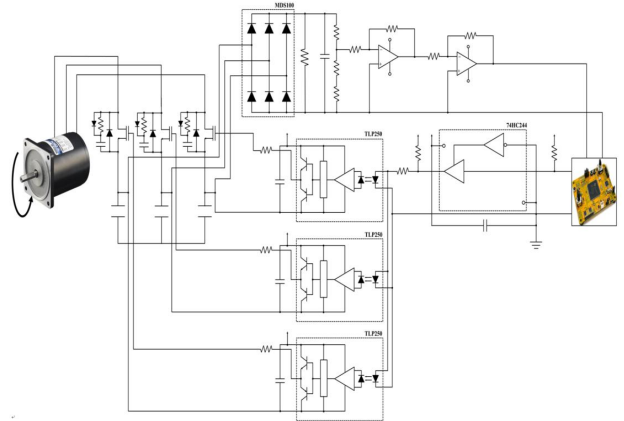


그림 3 에너지 회수를 위한 제안된 시스템의 개략도
Fig. 3 Schematic of the proposed system for energy recovery

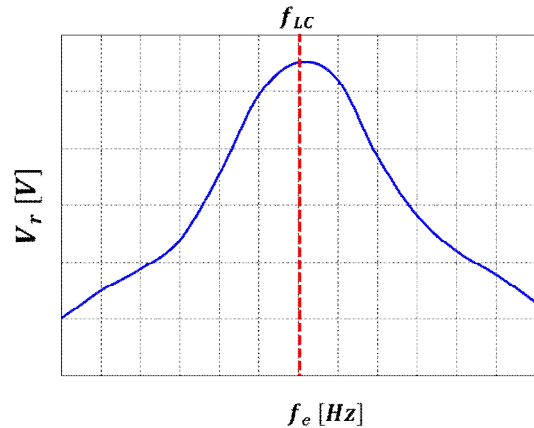


그림 4 속도 주파수와 공진 주파수 사이의 관계로 발생된 전압 크기
Fig. 4 Voltage magnitude generated by the relationship between speed frequency and resonant frequency

2.2 전압 제어 알고리즘

그림 5는 전기자동차 PMSM 에너지 회수 시스템의 전압 제어 알고리즘이다.

이 알고리즘은 배터리를 충전하기 위해 적절한 전압으로 제어하는 방법을 제안했다. 먼저, 전기자동차의 속도에 따라 속도 주파수가 변하기 때문에 전기자동차의 속도가 f_e 로 계산되고 f_e 와 f_{res} 를 비교한다. f_e 가 f_{res} 보다 크면 듀티를 줄임으로써 공진율이 증가하고 전압이 상승한다. 또한 저속에서 전압을 얻기 위해 커패시터가 없이 연결된 PMSM은 고속으로 높은 전압을 얻는다. 따라서 리버스 PI 제어기를 통해 오차가 작아짐에 따라 듀티를 증가시키는 제어가 수행된다. PI 제어기에 대한 입력 오류 값은 이동 평균 필터를 통한 정류된 전압의 필터링 값과 기준전압 간의 차이로 계산된다. 스위칭 주파수는 FET 스너버 회로의 R 및 C 값에 따라 달라진다.

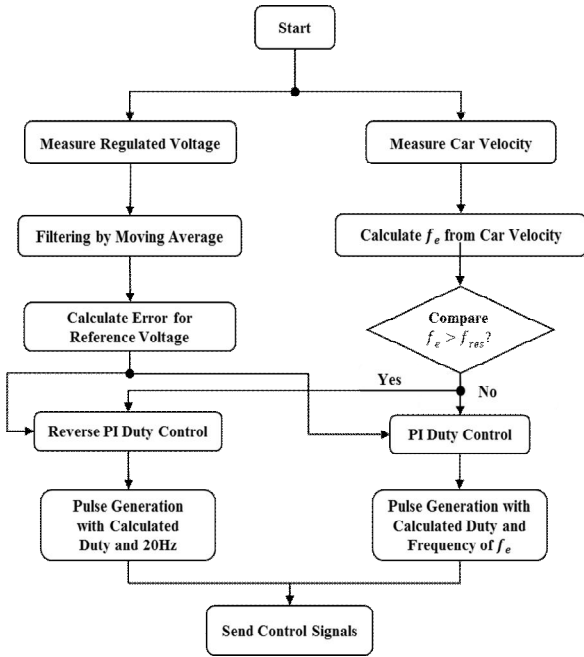


그림 5 전기자동차 PMSM 전압제어 알고리즘
Fig. 5 Electric vehicle PMSM voltage control algorithm

3. 시뮬레이션

전기자동차의 에너지 회수를 위한 전압 제어를 Matlab Simulink를 통해 모의 실험하였다.

그림 6은 전기자동차용 PMSM 전압 제어 시뮬레이터이다. 제어기, PMSM, FET, 커패시터, 3상 AC / DC 컨버터, 저항 부하, 평활 커패시터, 오실로스코프 및 여러 전압과 전류를 측정하기 위한 멀티미터로 구성된다. 시뮬레이션의 편의를 위해 속도는 일정하다고 가정하였다. 표 1은 시뮬레이터에서 사용된 파라미터 값이다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값

Table 1 The parameter values used in the simulation

Rated Power	840	[W]
Rated Voltage	400	[V]
Rated Speed	2000	[rpm]
Torque Constant	2.4	Nm/A
Back-EMF Constant	147	V/krpm
Stator Resistance(ph-ph)	17	[Ω]
Armature Inductance(ph-ph)	54.5	[mH]
Stator Capacitance	125	[uF]
Resonance Frequency	60	[Hz]
Poles	6	-
Load Resistance	500	[Ω]
Smoothing Capacitance	2000	[uF]
Snubber Resistance	100	[Ω]
Snubber Capacitance	20	[uF]

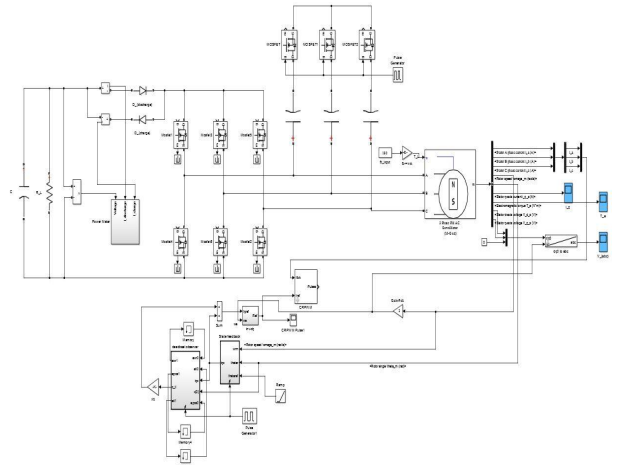


그림 6 전기자동차의 PMSM 전압 제어를 위한 시뮬레이터 구성도
Fig. 6 Simulator configuration diagram for PMSM voltage control of electric vehicle

그림 7 ~ 9는 표 1의 조건에서 다른 속도 주파수에 따라 전압 제어 시뮬레이션 결과이다.

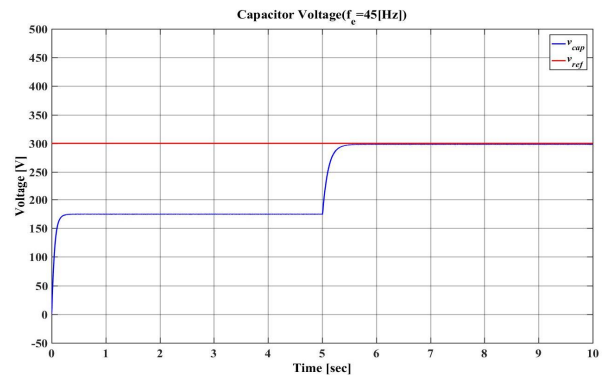


그림 7 시뮬레이션 결과 ($f_e = 45$ [Hz])

Fig. 7 Simulation result ($f_e = 45$ [Hz])

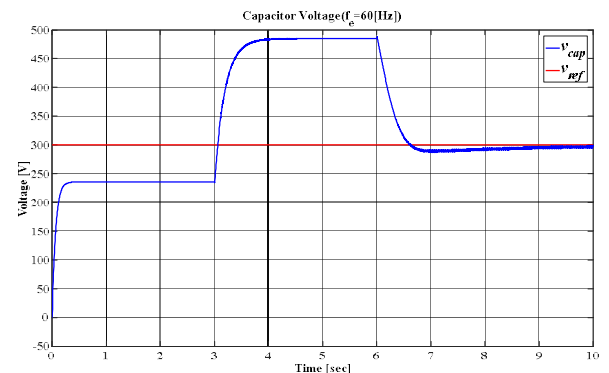


그림 8 시뮬레이션 결과 ($f_e = 60$ [Hz])

Fig. 8 Simulation result ($f_e = 60$ [Hz])

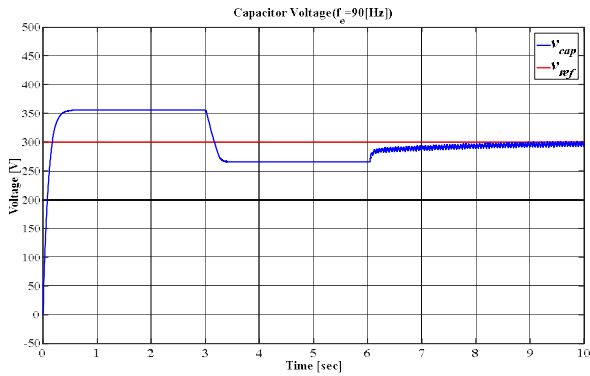


그림 9 시뮬레이션 결과 ($f_e = 90$ [Hz])
 Fig. 9 Simulation result ($f_e = 90$ [Hz])

그림 7은 45 [Hz]의 속도 주파수로 시뮬레이션을 한 결과이다. 공진회로가 연결되어 있지 않으면 (Off state) 속도가 낮아 공진이 이루어지지 않기 때문에 발생 전압은 174 [V]가 된다. 그러나 전기자동차는 저속임에도 불구하고 PMSM에 의해 생성된 전압은 공진회로를 통해 기준 전압 (300 [V])으로 제어된다.

그림 8은 60 [Hz]의 속도 주파수로 시뮬레이션을 한 결과이다. 처음 스위치가 꺼진 상태에서 공진이 발생하지 않으므로 전압이 기준 전압보다 낮다. 3초부터 공진회로를 연결하면 (On state) 속도 주파수는 공진 주파수와 유사하기 때문에 고전압이 발생한다. 그러나 제어를 6초에서 시작하면 듀티는 PI 제어기를 통해 제어되고 전압은 기준 전압으로 제어된다.

그림 9는 90 [Hz]의 속도 주파수로 시뮬레이션을 한 결과이다. 처음 스위치가 꺼진 상태에서 공진이 발생하지 않지만 전기자동차가 고속이기 때문에 기준 전압보다 높은 전압이 발생된다. 3초부터 On state로 하면 속도 주파수와 공진 주파수의 차이가 크기 때문에 전압은 기준 전압보다 작다. 그러나 제어를 6초에서 시작하면 듀티는 리버스 PI 제어기를 통해 제어되고 전압은 기준 전압으로 제어된다.

4. 결론 및 앞으로의 과제

본 논문에서는 전기자동차의 주행거리를 늘리기 위해 PMSM이 생성하는 전압을 배터리에 충전하기 용이한 전압으로 제어하는 방법을 연구했다. 이 방법을 사용하면 배터리에 충전하는 전압을 증가시켜 에너지 회수율을 높일 수 있다. 또한 제동 안정성과 전기자동차의 주행거리를 증가시킬 수 있다.

앞으로의 과제로는 그림 10과 같은 M-G set 축소 모델을 통해 이 전압 알고리즘을 적용하여 실험할 것이다.



그림 10 PMSM 에너지 회수 최대화 연구를 위한 M-G set 실험 구성
 Fig. 10 M-G set experiment configuration for PMSM energy recovery maximization study

또한 FET의 스너버 회로를 구성하여 최적화함으로써 효율을 향상시키고 수학적 모델링을 통한 속도 및 부하 토크에 따라 전압 제어 방법을 연구할 것이다.

본 연구는 한국산업기술평가관리원의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Jeong Hwa Kang, World Environmentally Friendly Cars Industry Trends, The Export Import Bank of Korea, April 2015.
- [2] Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, McGraw Hill Co., 2003.
- [3] Sung Chul Jung, In Sik Yoon, and Jong Sun Ko, "Electromagnetic Retarder's Power Recovery Device and Voltage Control", The Transactions of Korean Institute of Power Electrnics. Vol. 21, No. 2, pp. 396-403, Oct. 2016.
- [4] Ali Emadi, Young Joo Lee and Kaushik Rajashekara, "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, June 2008.
- [5] Kelvin Tan and Syed Islam, "Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 2, pp. 392-399, June 2004.