

전자기형 리타더의 모델링 및 전압제어

정성철*, 이익선*, 고종선*
단국대학교 전자전기공학부*

Electromagnetic Retarder's Modeling and Voltage Control

Jung sung chul*, Lee ik sun*, Ko jong sun*

Department of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University*

ABSTRACT

일반적으로 대형 버스 및 트럭 등 같은 경우, 부하가 아주 크다. 또한 내리막길이나 장거리 운행 시에 잦은 제동으로 인하여 마찰을 이용한 기존 방식의 브레이크들은 브레이크 과열 및 페이드 현상 때문에 제동 안전성에 문제가 있다. 이러한 제동 부담을 분담하기 위해 현재 보조브레이크(리타더)가 필수적이며, 엔진 계통의 보조브레이크가 아닌 비접촉식 브레이크 같은 친환경 보조브레이크가 요구되고 있다. 그리고 차량 제동 시 발생하는 기계에너지를 전기에너지로 회생하여 에너지효율을 향상시키려는 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 와전류를 이용한 전자기형 리타더에서 발생하는 전기에너지를 회수하기 위한 전압 제어 방법을 다룰 것이다. 리타더의 제동에너지를 전기에너지로 회생하기 위해 LC 공진회로로 구성하였다. 리타더를 자여자 유도발전기(Self Excited Induction Generator)로 모델링 하였고 이를 토대로 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 자여자 유도발전기의 구동 조건에 대해서 언급하고 이를 파라미터에 따라 3D map으로 만들었다. 또 회로 중의 FET 게이트에 전압을 인가하는 제어장치의 구동펄스에 따라 바뀌는 공진회로의 전압을 분석하였으며, 이 전압을 제어하기 위하여 PI 제어기를 이용한 알고리즘을 제안하였다. 이 전압을 3상 AC/DC컨버터를 통과한 후 DC/DC컨버터를 통하여 차량 내부의 배터리에 충전되는데 제어 위해 3상 AC/DC에서의 전압 리플을 MA(Moving Average) 방식의 필터를 사용하여 DC/DC컨버터의 입력에 맞도록 제어하였다. 이와 같이 전자기형 리타더에서 유도되는 전압을 제어기의 제어 펄스에 따라 제어할 수 있으며 Matlab Simulink를 이용하여 리타더의 모델과 그 제어기의 타당성을 보였다. 또 실제 M G Set 실험을 통하여 그 연관성을 확인하였다.

1. 서론

최근 대형 상용차의 제동 시스템의 성능 향상을 통한 제동 안정성 확보가 대두되고 있다. 그럼에 따라 주브레이크뿐만 아니라 추가적으로 보조브레이크가 필수적이다. 또 배기가스 규제 강화로 인하여 엔진 계통의 보조 브레이크는 사용률이 떨어지게 되어 전체 제동력 감소가 야기되므로, 친환경적인 보조브레이크 시스템의 추가 장착이 필요하다. 중대형 차량 분야는 전체 총 차량으로 보면 작은 부분을 차지하지만, 도로 수송에

서 총 연료 및 에너지 소비로는 많은 부분을 차지한다. 비교적 연비가 낮고, 연간 장거리를 다니기 때문에 중대형차량의 에너지 절약은 필수적이다. 그렇지만 아직 회생이 되는 보조브레이크는 상용화된 사례가 없다. 국내에서는 2017년 1월부터 보조브레이크 법규 강화 시행됨에 따라 리타더는 중대형차량의 스펙 중에 중요한 부분을 차지하고 있다.

리타더는 자여자 유도발전기로 동작원리로 보면 모델링할 수 있고, 리타더에서 발생하는 전압 제어 방법을 다룬다. 그리고 발생하는 전압을 제어함으로써 3상 AC/DC컨버터 및 DC/DC컨버터를 통한 배터리의 충전을 극대화한다.

본 논문에서는 리타더의 에너지회수를 위하여 LC공진회로를 제안하였고 에너지 회수 및 배터리 충전을 용이하게 하기 위하여 전압제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 알고리즘은 피드백 되는 커패시터 양단의 전압에 따라 PI 듀티 제어 혹은 PI 리버스 듀티 제어를 동작하게 된다. 제안된 시스템은 매트랩 시뮬링크를 통해 모의실험 및 M G Set 축소모델 실험을 통해 검증하였다.

2. 리타더의 전압제어

2.1 리타더 모델링

리타더는 동작원리와 그 구조로 인해 자여자 유도발전기로 모델링할 수 있다. 리타더가 동작하기 위해 커패시터가 직렬로 연결된 리타더의 상태 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 $p = d/dt$ 이다. $[i] = [Z]^{-1}[v]$ 형태로 정리한 후 자여자(Self excitation)에 관여하는 i_{ds} 는 v_{ds} 의 초기 값이 0이기 때문에 i_{ds} 가 존재하기 위해서는 Z의 행렬식이 0이어야 한다[1]. Z의 행렬식을 구하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\det(Z) = Ap^6 + Bp^5 + Dp^4 + Ep^3 + Fp^2 + Gp + H = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서,

$$\begin{aligned}
 A &= C^2 L_m^4 - 2^* C^2 L_m^2 L_r L_s + C^2 L_r^2 L_s^2 \\
 B &= -2R_s C^2 L_m^2 L_r - 2R_r C^2 L_m^2 L_s + 2R_s C^2 L_r^2 L_s \\
 &\quad + 2R_r C^2 L_r L_s^2 \\
 D &= C^2 L_m^4 \omega_c^2 - 2C^2 L_m^2 L_r L_s \omega_c^2 - 2C^2 L_m^2 R_r R_s \\
 &\quad + C^2 L_r^2 L_s^2 \omega_c^2 + C^2 L_r^2 R_s^2 + 4C^2 L_r L_s R_r R_s \\
 &\quad + C^2 L_r^2 R_r^2 - 2CL_m^2 L_r + 2CL_r^2 L_s \\
 E &= -2C^2 L_m^2 L_r R_s \omega_c^2 + 2L_s C^2 L_r^2 R_s \omega_c^2 \\
 &\quad + 2C^2 L_r R_r R_s^2 + 2L_s C^2 R_r^2 R_s - 2CL_m^2 R_r \\
 &\quad + 2CL_r^2 R_s + 4L_s CL_r R_r \\
 F &= C^2 L_r^2 R_s^2 \omega_c^2 + C^2 R_r^2 R_s^2 - 2CL_m^2 L_r \omega_c^2 \\
 &\quad + 2L_s CL_r^2 \omega_c^2 + 4CL_r R_r R_s + 2L_s CR_r^2 + L_r^2 \\
 G &= 2CR_s L_r \omega_c^2 + 2L_r R_r + 2CR_s R_r^2 \\
 H &= L_r^2 \omega_c^2 + R_r^2 \\
 p &= d/dt \text{이다.}
 \end{aligned}$$

2.2 리타더 구동 파라미터 설계

식 (1)에서 본래 Z의 행렬식을 구하면 8차 다항식이 나오지만 수학적으로 식을 정리하면 위 식(2)와 같이 6차 다항식으로 줄일 수 있다[2]. 초기 과도상태인 미분방정식의 해 $i = Ke^{pt}$ 에서 초기 값 K는 발전기의 잔류자기에 관여되어 있다. 잔류자기가 존재한다면 $K \neq 0$ 이고 $\det(Z)=0$ 일 때의 근을 구하고 이때의 근의 실수부가 하나라도 양수에 있으면 지수적으로 증가하므로 i가 증가하여 자여자 발전이 가능하다. 하지만 전류는 계속 증가하지 않고 B H 곡선에서 포화되어 근의 실수부가 0이 되는 방향으로 L_m 이 변화한다.[3]

따라서 리타더의 에너지를 회수하기 위한 동작할 수 있는 실제적으로 파라미터 값을 설계한다. 파라미터 중 커패시턴스와 속도를 변수로 하고 나머지 값은 일정한 값으로 고정시킨 후 Z의 행렬식의 근의 실수부가 양수가 나오는지 확인하였다. 여기서, $R_s=22.13 [\Omega]$, $R_r=3.6 [\Omega]$, $L_{sl}=250 [\text{mH}]$, $L_{rl}=2.5 [\mu\text{H}]$, $L_m=400 [\text{mH}]$ 의 값으로 한다.

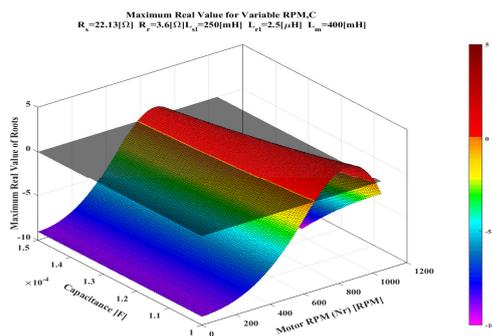


그림 1 커패시턴스와 모터 속도에 따른 행렬식 Z의 해 3D-map
Fig. 1 Roots of determinant 3D-map of Z for capacitance and motor RPM
설계 시 자동차 주 속도에 따른 주파수를 계산하여 고정자의 L과 C의 값을 조정하여 공진주파수로 맞춰주면 LC 공진 회로에 최대 전압을 발전시킬 수 있다. 차량의 속도에 대한 전기주파수 f_e 는 다음 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_e &= \frac{(km)}{(h)} \times \frac{1}{2\pi(\text{rad})} \times \frac{1000(m)}{1(km)} \times \frac{1(h)}{3600(s)} \\
 &\quad \times \frac{1(\text{rev})}{2\pi r(m)} \times \frac{2\pi(\text{rad})}{1(\text{rev})} \times \frac{\text{poles}}{2}
 \end{aligned} \quad (3)$$

공진주파수 f_{res} 는 다음 식 (4)와 같다.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (4)$$

3. 시뮬레이션

아래 그림 2는 리타더 전압 시뮬레이터 구성도이며 Matlab Simulink를 이용하였다.

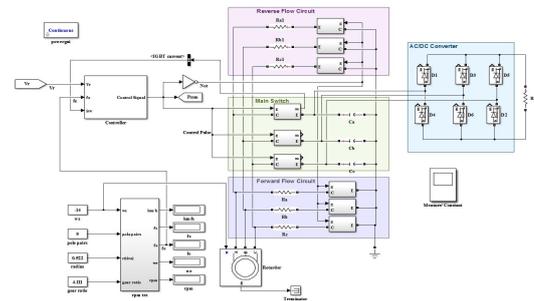


그림 2 리타더 전압 시뮬레이터
Fig. 2. Retarder voltage control simulator.

그림 3은 $f_e = 17.19 [\text{Hz}]$ 일 경우의 시뮬레이션 결과로서 알고리즘에서 $f_e < f_{res}$ 경우에 속한다. f_e 와 f_{res} 가 비슷하지 않은 경우이므로 공진율이 낮기 때문에 스위치를 도통 상태만 유지할 경우 200 [V]로 결과가 나오지만 제어신호를 통하여 다른 주파수가 관여하여 공진율을 높이기 때문에 기준전압 300 [V]로 제어된 것으로 확인할 수 있다.

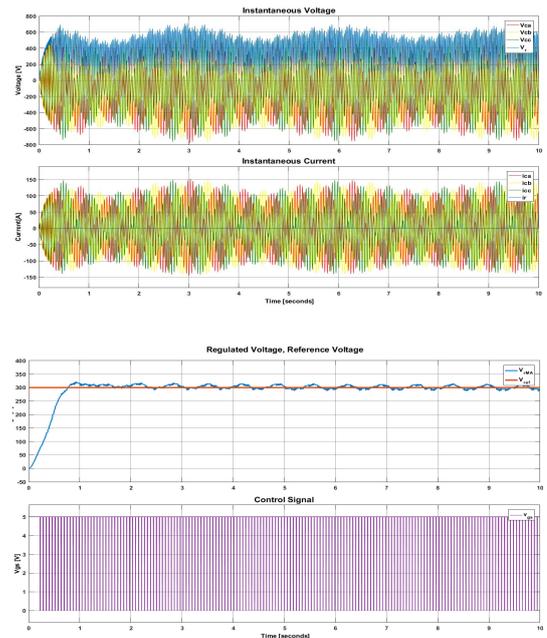


그림 3 시뮬레이션 결과 ($f_e = 17.19 [\text{Hz}]$)
Fig. 3 Simulation result for $f_e = 17.19 [\text{Hz}]$

그림 3은 $f_e = 20.05 [Hz]$ 일 경우의 시뮬레이션 결과로 알고리즘에서 $f_e \approx f_{res}$ 경우에 속한다. f_e 와 f_{res} 가 비슷한 경우이므로 공진율이 높아서 스위치를 도통 상태만 유지할 경우 560 [V]로 결과가 나오지만 제어신호를 통하여 공진율을 낮춤으로써 기준전압 300 [V]로 제어된 것으로 확인할 수 있다.

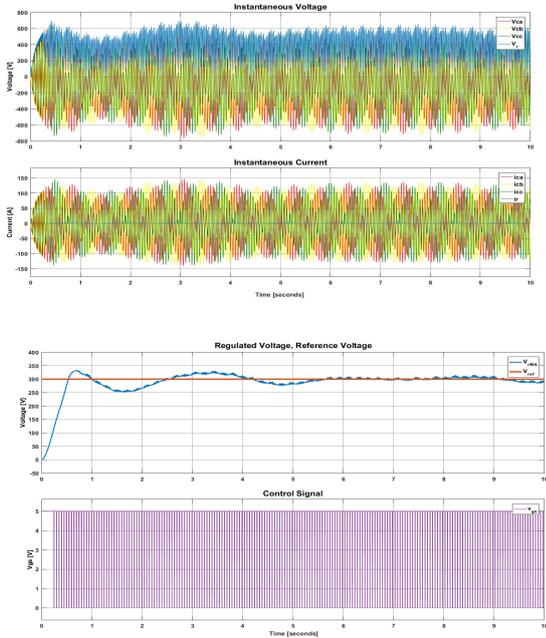


그림 4 시뮬레이션 결과 ($f_e = 20.05 [Hz]$)
Fig. 4 Simulation result for $f_e = 20.05 [Hz]$

4. 실험

본 논문에서는 제어 신호를 통해 커패시터의 전압 실효값을 측정하고 이 실험값을 시뮬레이션과의 비교하였다. 그리고 f_e 가 f_{res} 이 비슷할 경우 듀티가 작을수록 전압이 작아짐으로써 전압제어가 가능함과 파형의 유사정도를 확인하였다.

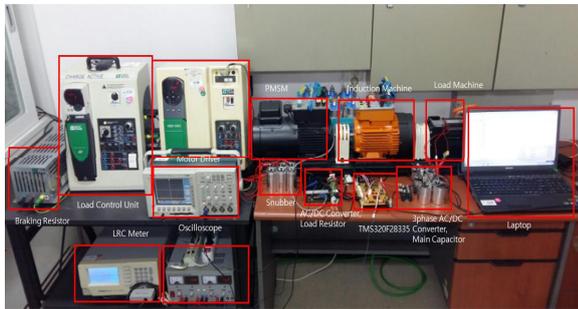


그림 5 리타더 실험을 위한 M-G set 축소모델
Fig. 5 M-G set Miniature for Retarder Experimental

그림 5는 리타더 실험을 위한 M G set 축소모델의 구성이다. Motor Driver를 통해 PMSM을 모터로 구동하게 되고 PMSM과 Induction Machine이 커플링 되어있다.

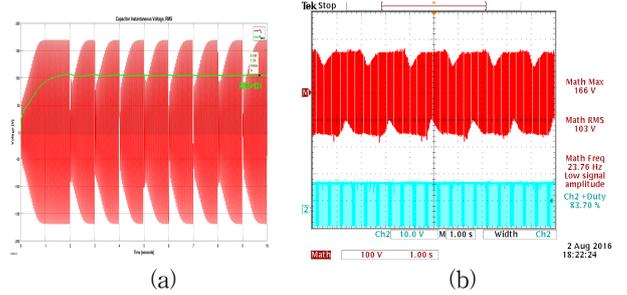


그림 5 커패시터 순시 전압 값 (a) 시뮬레이션 (b) 실험
Fig. 5 Capacitor Instantaneous Voltage (a)Simulation (b)Experimental

실험을 통한 그래프로 그림에서 MATH 채널은 커패시터의 전압 Ch2는 게이트 인가한 전압이다. (c)의 경우 스위칭을 통하여 실험값과 비슷한 전압 실효값이 104 [V]가 된다.

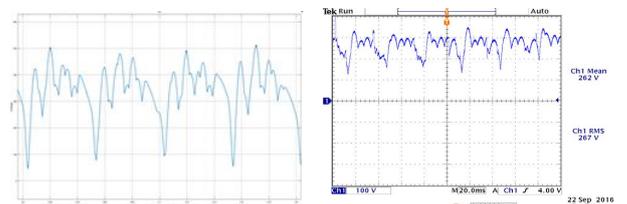


그림 6 커패시터 순시 전압파형 모양(a) 시뮬레이션 (b) 실험
Fig. 6 Capacitor Instantaneous Voltage Shape (a)Simulation (b)Experimental

그림 6은 시뮬레이션과 실험의 결과로 비슷한 모양의 파형이 나오는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 리타더의 원리를 설명하고 SEIG로 모델링하고 파라미터 값을 설계하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 리타더에 유도되는 전압을 사용하기 용이한 전압으로 제어하였다. 차량의 주 속도에서 에너지가 집중적으로 회수할 수 있도록 공진주파수와 비슷할 경우에는 전압이 높게 유도되므로 공진율을 낮추어서 전압을 제어한다. 만일 제동으로 속도가 줄어서 공진주파수와 차이가 있더라도 제어신호를 통하여 전압을 제어하여 에너지를 최대한 회수할 수 있도록 하는 제어를 제안하였다. 실험에서는 시뮬레이션에서 증명된 알고리즘이 실제 사용 가능함을 보이고자 듀티와의 연관성을 보이도록 하였다. 즉 제어신호를 통하여 전압이 원하는 방향으로 바뀌는 것을 확인하였다. 향후 DSP를 통하여 전압을 실시간 제어하고자 한다.

참고 문헌

- [1] C. Grantham, D. Sutanto, and B. Mismail, "Steady state and transient analysis of self excited induction generators," IEE Proceedings, Vol. 136, Pt. E, No. 2, Mar. 1989.
- [2] D. Seyoum, C. Grantham, and M. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self excited induction generator driven by a wind turbine," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, pp. 936-944, Jul./Aug. 2003.
- [3] 정성철, 윤인식, 고종선, "전자기형 리타더의 전력회수장치 및 전압제어, 전력전자학회논문지, pp396-403, 2016, 10