

전기자동차 회생제동에 관한 연구

전 범진^o, 설 승기
서울대학교 공과대학 전기공학부

A Study on Regenerative Braking of Electric Vehicle

Beom-Jin Jeon^o, Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract In this paper, the regenerative braking control system for 4 WD Electric Vehicle (EV) is proposed. Many studies on efficient drive of EV are being done to prolong the one charge distance. By using the regenerative braking (REGEN), the resulting EV system has following advantages : a) battery is recharged with the mechanical energy of EV, b) the running load can be reduced, and consequently the efficiency can be increased. The problem of REGEN that the power acceptance ability of battery is limited can be solved by controlling regenerative braking torque. The proposed control system has following characteristics. : a) It controls regenerative power by varying mechanical braking torque. b) It controls mechanical braking torque using load torque observer. c) It controls the regenerative braking torque independently. The control scheme and simulation results are presented for the experimental car.

1. 서론

환경문제에 대한 관심이 높아지면서 무공해 자동차에 대한 관심이 증대되어 왔고 최근 축전지 기술의 향상과 전력전자 기술의 발전에 힘입어 무공해 자동차로서 전기자동차가 유력해졌다. 그런데 전기자동차의 가장 큰 약점은 축전지의 에너지 밀도[Wh/Kg]가 내연 기관 자동차의 연료에 비해 크게 낮다는 데 있다. 이로 인해 전기 자동차의 일종전 주행거리는 내연기관 자동차보다 더 짧다. 이를 극복하기 위해 더 나은 축전지 기술을 개발하려는 노력이 계속되고 있지만 화학에너지로의 저장에는 이론적으로 한계가 있다[1]. 따라서 주어진 축전지에너지로 주행거리를 최대로 하기 위해 운전효율의 증대에 관한 연구들이 진행되고 있는데 그 한 방법으로 회생제동을 들 수 있다. 회생제동은 제동시 자동차의 운동에너지를 브레이크에서 마찰 에너지로 소모하는 기계적 제동과는 달리 구동모터를 발전기로 운전하여 그 운동에너지를 다시 전기에너지로 바꾸어 축전지에 충전시키는 것이다.

회생제동의 잇점은 첫째로 효율이 증대된다는 점이다. 회생 제동을 하지 않는 경우와 비교할 경우 그 회생 에너지량은 일 충전 주행동안 회생제동을 어느 속도에서 얼마나 자주 하느냐에 달려 있지만 가속과 감속을 빈번히 하는 도심지 운전의 경우 회생제동을 채택하는 것이 더 유리하리라 생각된다. 둘째로 주행저항을 감소시킬 수 있다는 점이다. 기계적 제동력만을 제

용한 경우 그 응답성을 높이기 위해서 브레이크 패드를 디스크에 밀착시킨 경우가 대부분이고 이로 인해 발생하는 마찰저항(brake drag)이 전체 주행저항의 12-25%에 달한다. 회생제동을 함께 채용하면 패드를 디스크에 밀착시키지 않아도 빠른 응답성을 유지할 수 있으므로 마찰저항을 제거할 수 있어서 주행부하를 줄일 수 있다[2].

그런데 회생제동을 구현하는데는 다음과 같은 문제가 있다. 축전지의 충전상태 따라서 축전지가 흡수할 수 있는 전력에는 한계가 있어서, 그 이상의 전력을 공급하면 축전지에 나쁜 영향을 미치므로 회생전력을 제한해야 한다는 점이다[3]. 이러한 회생전력의 제한에 의해 회생 제동력이 변할 때 전체 제동력을 일정하게 유지하려면 가감된 회생 제동력만큼 기계적 제동력이 동시에 변해야하므로 기계적 제동력을 회생 제동력과 함께 제어해야 한다.

본문에서는 회생 전력 제한에 따라 회생 제동력 조절이 가능하고, 동시에 기계적 제동력을 제어하여 전체 제동력을 선형적으로 제어할 수 있는 전기자동차 회생제동 제어 시스템을 제안하고 시뮬레이션을 통해 그 가능성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 회생 제동 시스템 구성

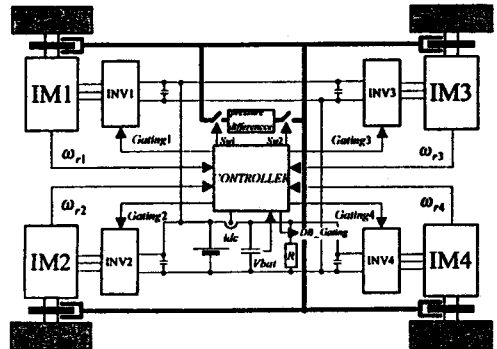


그림 1. 회생제동시스템

그림 1은 제안된 회생 제동시스템의 전체 구성도이다. 기존의 4륜 구동 전기자동차[4]에 제동용 유압회로와 DB(Dynamic Braking)용 저항을 추가한 형태이다. 제동용 유압 회로는 유압차를 유지하는 유압장치와 solenoid valve 2개로 구성되어 있

다. 자동차가 ABS(Anti-lock Braking System) 성능을 가지려면 제동시 전륜과 후륜에 걸리는 하중이 달라져서 바퀴가 고착(lock)되는 제동력이 각기 다르기 때문에 전륜과 후륜의 제동 유압을 독립적으로 제어할 수 있는 유압회로가 필요하다[5]. 그러나 4륜 구동의 경우 네 바퀴의 제동력을 독립적으로 제어할 수 있기 때문에 그림과 같이 네바퀴의 제동 유압을 동일하게 제어하는 보다 간단한 유압회로도도 ABS를 실현할 수 있는 잇점이 있다.

DB는 회생제동시 축전지에 들어가는 회생전력을 제어함과 동시에 제동력을 안정되게 제어하는 역할을 한다. 제동력이 안정적으로 제어되려면 회생 제동력의 변화를 기계적 제동력이 보상해 주어야 한다. 그런데 기계적 제동력은 solenoid valve를 동작시키는 데 수 msec정도, 또 압력이 증가하는데도 시간이 걸리기 때문에 전기적 제동력만큼 빠른 응답을 기대할 수 없다. 따라서 기계적 제동력이 원하는 값에 도달할 때까지 회생 제동력을 유지시키기 위해 그동안 회생전력을 저항으로 소비시킨다.

2.2 제어 원리

2.2.1 회생 전력 제어 원리

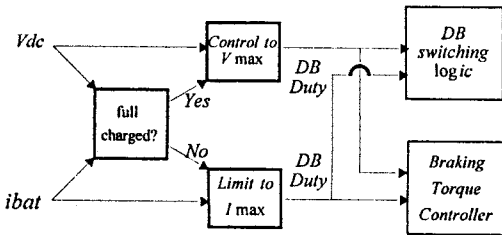


그림 2 회생 전력 제어 블럭도

그림 2에서 Vdc는 DC link전압, ibat는 충전전류를 나타낸다. 축전지의 충전상태를 판단하는 데는 여러가지 방식이 있겠지만[6] 간단히 축전지의 충전전류에 대한 전압의 관계에서 충전지의 충전상태를 파악하기로 한다. 만약 축전지가 100% 충전 상태에서 큰 회생 전류가 들어갈 경우 가스가 발생하는 등 축전지에 해를 주게 된다. 또 축전지가 100% 충전상태가 아니라도 과도한 전류가 흐르면 축전지에 마찬가지로 좋지 않은 영향을 미친다[7]. 본 논문에서는 회생전력을 축전지 급속 충전방식 중 정전류, 정전압방식에서 충전전력을 제어하는 방식[8]으로 제어한다. 즉, 만충전 상태가 아니면 회생전류를 기준치 이하로 제어하고(전류제한 모드), 만충전 상태에서는 DC Link 전압을 기준치로 제어한다(정전압 모드).

두 모드에서 각각의 제어기는 DB 스위치를 작동시키 전압 또는 전류를 제한치이내로 제어함과 동시에 초과 또는 여유 전력의 크기를 Duty의 크기와 부호로 제동력 제어부에 입력하여 기계적 제동력을 가감시킴으로써 간접적으로 회생전력을 제어한다.

그림3은 회생전력이 제어되는 과정을 나타내는데 x축은 회생전력을 y축은 전력을 나타낸다. 그림3에서 T_b 는 차속이 ω_v 일때 사용자가 요구하는 제동력을 나타내고 P_{Rmax} 는 제동시점에서 축전지가 흡수할 수 있는 회생전력의 최대치이다. 다음 절에서도 설명하겠지만 제동력 제어기는 시스템의 응답성을 높이기 위해 회생 전력과 독립적으로 회생 제동력을 제어한다. 따라서 회생 제동력 T_r 은 처음에는 DB가 되고 초과전력 P_{db} 는 DB 저항에서 소비한다(그림(1)). DB제어기는 DB로 초과전력을 소모함과 동시에 제동력 제어부에 전력의 초과분을 입력하면 제

동력 제어부는 이에 대응하여 기계적 제동력을 T_m 으로 증가시키게 되고 T_r 은 그만큼 줄어 P_{db} 가 0이 된다(그림(2)). 시간이 흘러 제동력에 의해 속도가 줄어들면 그림(3)과 같이 동일한 제동력 요구 T_b 에 대해 회생전력은 줄어든다. 이때 DB제어기는 흡수 가능 회생전력의 여유분을 앞과 같이 제동력 제어기에 전달하고 제동력 제어기는 기계적 제동력을 줄여 축전지는 언제나 흡수 가능한 최대 회생전력을 흡수하게 된다(그림(4)).

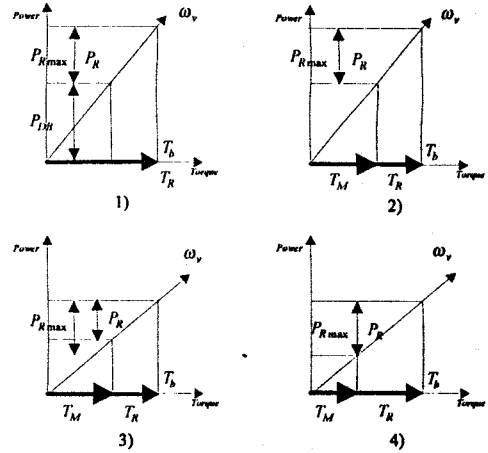


그림3 회생 전력 제어 과정

2.2.2 제동력 제어 원리

앞절에서 말했듯이 회생 전력은 회생 제동력에 의해서가 아니라 기계적 제동력에 의해서 간접적으로 제어된다. 이렇게 해서 얻을 수 있는 잇점은 응답이 빠른 회생제동력을 회생 가능 전력에 구애받지 않고 제어할 수 있어서 ABS와 같이 제동력 지령치가 급변하는 경우 유리하다. 그대신 DB를 사용하여 응답이 느린 기계적 제동력을 대신해서 초과되는 회생전력을 빨리 분담시킬 필요가 있다. 동일한 분담전력에 대해 그 지속시간이 작을수록 DB용 저항의 정격은 낮아지므로 기계적 제동력이 가능한 빨리 제어되는 것이 유리하다.

제동력을 지령치에 따라 제어하려면 가감된 기계적 제동력 만큼 회생 제동력을 변화시켜야 하고 따라서 기계적 제동력 값을 알아야 한다. 식(1)은 차량의 운동방정식이다.

$$T_r + T_m = T_v + J_M \dot{\omega}_M \quad (1)$$

$$T_r + (T_m - T_r) = T_r - \hat{T}_L = J_M \dot{\omega}_M = T_b \quad (2)$$

여기서, T_r 은 회생 제동력, T_m 은 기계적 제동력, T_v 는 부하 토크, J_M 은 모터, 기어, 바퀴의 관성을 모두 포함한 구동부 관성, $\dot{\omega}_M$ 은 모터 속도이다. 이 식에서 안수 있듯이 ω_M 과 T_r 을 알아도 T_v 를 모르면 T_m 을 알 수 없다. 따라서 식(2)와 같이 T_m 과 T_v 를 포함한 T 을 구하여 T_m 을 간접적으로 제어한다.

그림4는 제동력 제어블럭도이다. 그림에서 알 수 있듯이 T 은 외란의 영향을 줄이기 위해 전차원 관측기(Full Order Observer)를 통해 구한 값을 사용하였다. T_r 은 회생제동력 지령치를 사용하고, ω_M 은 모터에 부착된 엔코더로 입력받은 위상각을 관측기에 입력하여 얻는다.

사용자가 브레이크 페달을 통해 요구하는 자동차 가속도 a_v 는 모터 가속도 a_M 과 같다고 보고 제동력 지령치 T_b 는 a_v 에 자동차 등가 관성을 곱해서 구한다. 식(2)를 사용해서 회생 제동력 지령치 T_{r_st} 를 생성한다. 제동력 지령치가 변하는 과도 상태 특성을 좋게 하기 위해 모터가속도의 추정치와 그 지령치

의 차에 전체관성을 곱한 T_{r_tr} 을 더해서 제어한다. 모터 가속도 추정치는 관측된 모터 속도를 미분하고 이를 저역 필터링하여 얻는다.

기계적 제동력은 회생 전력 제어부에서 입력한 duty를 가지고 압력을 증가시킬 것인지, 감소시킬 것인지를 판단하여 solenoid valve를 제어한다.

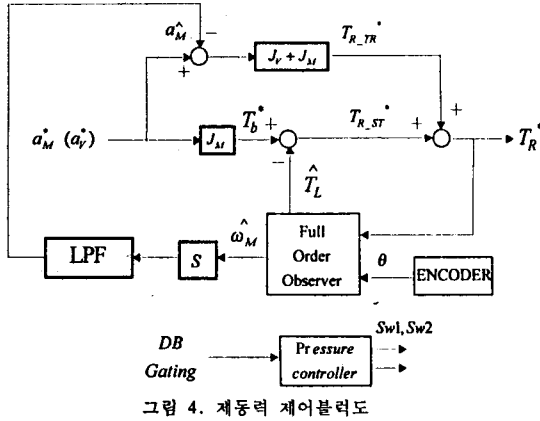


그림 4. 제동력 제어블럭도

3. 시뮬레이션 결과

표 1은 시뮬레이션에 쓰인 상수들이다.

차량무게	600Kg	solenoid on	5msec
바퀴무게	12Kg*4	증압속도	Full / 0.5sec
DClink C	4700uF	Vdc	300volt
회생전력제어주기	50usec	Vdc.max	320volt
제동력제어주기	1msec	모터정격	1마력*4

표 1. 실험차량 파라미터

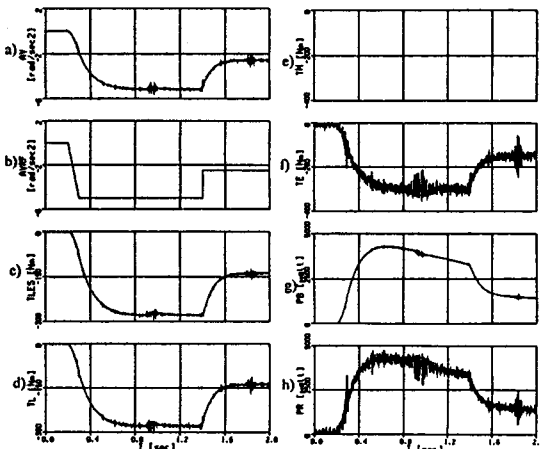


그림5. 회생 전력 제한 없을 때

그림5는 회생전력의 제한이 없을 때의 파형이다. a)는 실제 차량가속도, b)는 차량가속도 지령, c)는 관측된 부하토크, d)는 실제 부하 토크, e)는 기계적 제동력, f)는 전기적 제동력, g)는 축전지로 흡수되는 회생전력, h)는 모터가 발전하는 회생전력을 나타낸다. 그림6은 회생전력에 제한이 있을 때의 파형이다. 그림6의 a)에서 보다, 많은 리플을 볼 수 있는데

그 이유는 관측한 부하 토크와 실제부하 토크의 위상차 때문에 전기적 제동력이 기계적 제동력을 정확히 따라가지 보상하지 때문이다. 위상차를 줄이기 위해서는 관측기의 극값을 크게 해야 하는데 그렇게 하면 위상차는 줄어드는 대신 관측치 자체의 리플이 심해지므로 관측기의 극값을 적절히 선정하는 것이 매우 중요하다.

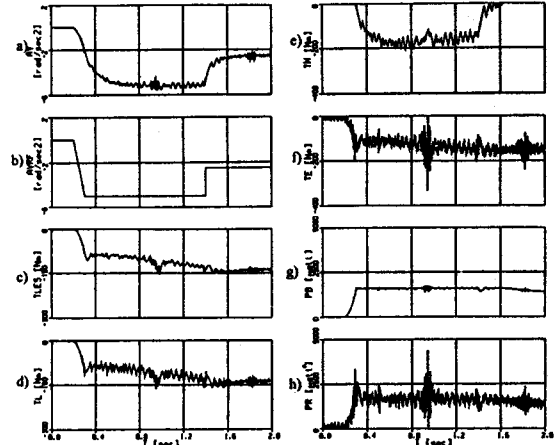


그림 6. 회생 전력 제한하에서

4. 결론

새로운 전기자동차 회생제동 제어원리를 제안하고 시뮬레이션을 통해 타당성을 검토하였다. 제어 시스템의 제동력 지령치 추종 특성과 주어진 회생전력한계에서 회생제동력과 기계적 제동력의 조화로운 동작을 확인 할 수 있었다.

5. 참고 문헌

- [1]F.J.Kruger,R.Gereth, "Advanced Battery Systems for Electric Vehicles - New Impuses for the Electric Automobile", 12th EVS, 1994, pp.201-207.
- [2]Yasuko Baba, Hisashi Ishitani, Hirokazu Suzuki, Noboru Fujiwara, Masayuki Yada, and Hiroshi Shimizu, "Evaluation of Overall Dynamic Performance of a High Performance EV, IZA, Based on On-Board Use Monitorng Data",12th EVS, 1994, pp.448-457.
- [3]P.Van den Bossche, " Safety Consideration for Electric Vehicles", 12th EVS,1994, pp.490-498.
- [4]정 유석, 설 승기, "4륜구동 전기자동차의 동역학을 고려한 회전력 조항제어", 석사학위논문,서울대학교,1995, pp.29-37.
- [5]장 병주, 자동차공학, 동명사, 1992, pp.210-217
- [6] 송 승구, 김 근호, 오 세춘, 박용식, 이성준, 김광수 "Peukert's Equation 응용 EV 전지 잔존용량계",제2회 G7 차세대 자동차 기술 Workshop, 1994, pp.691-695
- [7]Jiri K. Nor, "Very Fast Battery Charging and Battery Energy Management", 12th EVS, 1994, pp.117-125.
- [8]황 영문 외, 전기자동차 기술현황, 대한전기학회,1992, pp.99