

2단 기어를 통한 전기자동차의 모터와 인버터의 효율 개선

이태연, 남광희
포항공과대학교

Improvement of Motor and Inverter Efficiency Using Two Gear in EV

Taeyeon Lee, Kwanghee Nam
POSTECH

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차에 2단 기어를 사용하여 모터와 인버터 측면에서의 효율 개선을 목표로 하고 있다. 2단 기어 시스템에서의 높은 기어비를 갖는 1단 기어는 차량의 바퀴 쪽에서의 높은 토크를 낼 수 있도록 하며, 낮은 기어비를 갖는 2단 기어는 더 넓은 범위의 속도 구간을 보여준다. 2단 기어 시스템에서 개선된 효율을 보이기 위하여 토크와 속도 그리고 효율을 고려한 변속시점을 제안한다.

1. 서론

전기자동차에 대한 연구 개발이 활발해 짐에 따라 모터 및 인버터의 효율을 향상시키는 연구 역시 진행되어지고 있다. 전기자동차의 경우 1단 기어를 주로 사용하고 있는데 2단 기어를 사용함으로써 모터와 인버터의 효율을 개선하고, 최종적으로는 전기자동차의 주행거리를 늘리는 것이 목표이다. 전기자동차에 사용되는 모터와 인버터의 손실은 2단 기어를 사용함에 따라 감소하게 되는데^[1], 본 논문에서는 2단 기어의 1단과 2단의 변속 시점을 제안함으로써 손실을 최적화하는 것을 목표로 한다.

본 논문에서는 그림. 1의 US06 Driving Cycle을 선택하여 속도와 가속도의 값을 확인하였고, 중형차에 해당하는 차량 스펙을 선정하여 토크와 각속도에 대한 정보를 얻어내었다. Ferrari's Method를 사용하여 토크, 속도 그리고 전류에 관한 함수의 4차식을 해결하였으며, 이를 통해 전류 i_d , i_q 를 얻어 손실을 계산하였으며, 1단 기어와 2단 기어 시스템의 손실을 확인하였다.^[2]

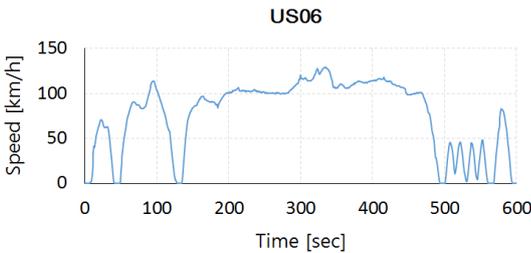


그림. 1 US06 운전 사이클
Fig. 1 US06 Driving Cycle

2. 변속 알고리즘 및 2단 기어 효율

2.1 변속 알고리즘

2단 기어 시스템에서는 높은 토크를 내는 1단과 고속 운전 을 가능하게 하는 2단 기어 사이의 변속 시점을 선정하여 효율을 최적화 할 수 있다. US06의 Driving Cycle을 감당할 수 있는 차량의 바퀴와 속도의 곡선을 임의로 선정하고, 기어비를 적용한 모터 쪽에서의 T N 커브를 얻어내었다. 두 기어비에 대한 두 개의 T N 커브를 이용하여 속도와 토크에 대한 격자를 나누어 각각 효율을 구하였으며, 차량의 바퀴 쪽에서의 T N 커브로 다시 전환한 뒤 효율을 비교하여 높은 효율을 보이는 값의 기어비를 그 구간의 기어비로 선정하여 각 격자 구간의 기어비를 확인하였다. 그림. 2와 같이 1단과 2단 기어비의 경계가 되는 부분을 변속 시점으로 선택하였고 토크, 속도 그리고 효율에 대한 함수로 정리하여 알고리즘을 적용하였다. 파란 부분은 1단 기어를 사용하고, 붉은 부분은 2단 기어를 사용하는 운전 영역이다.

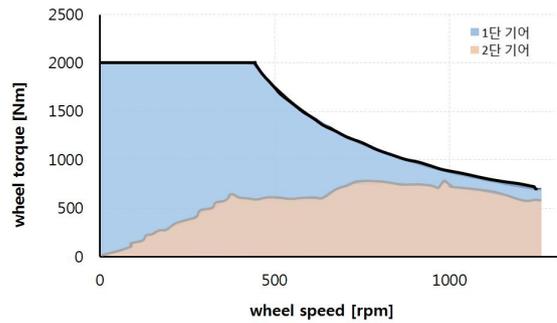


그림. 2 토크와 속도 그리고 효율을 고려한 변속시점

Fig. 2 Gear Shifting Time Considering Torque, Speed and Efficiency

2.2 변속 알고리즘 적용 및 최적 전류

그림.1의 US06과 차량의 다이내믹스를 고려하게 되면 모터 토크와 전기 각속도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 앞서 얻어낸 변속 시점을 수식적으로 뽑아내어 1단과 2단의 기어비를 적용한 토크와 각속도에 대해서도 확인하였다.

$$T_e = \frac{3P}{4}[\psi_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (1)$$

저속 운전 구간에서는 식(1)을 적용하여 토크 당 최적의 전류를 사용하는 Maximum Torque Per Ampere (MTPA) 기법을 사용하였다. 속도가 증가하는 경우를 고려하여 전압 제한을 넘지 않는 선에서 MTPA를 진행하였으며, 전압 제한이 넘어버리게 되는 구간부터는 Ferrari's Method를 이용하여 전류에 대한 최적 값을 계산하였다.^[2]

$$(\omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m)^2 + (\omega_e L_q i_q)^2 = V_s^2 \quad (2)$$

전압 제한 내에서 최대 전압을 사용하기 위해 식(1)과 식(2)의 연립을 통해서 전류 i_d 에 대한 4차식을 얻어내었고, Ferrari's Method를 사용하여 전류에 대한 정보를 확인하였다. 1단 기어만을 사용했을 때의 모터와 인버터의 전류를 계산한 것이 그림. 3과 같다. 제안하는 2단 기어는 변속 알고리즘을 고려하여 1단 기어비와 2단 기어비를 적용한 후에 전류를 계산하였고 그 결과는 그림. 4와 같다.

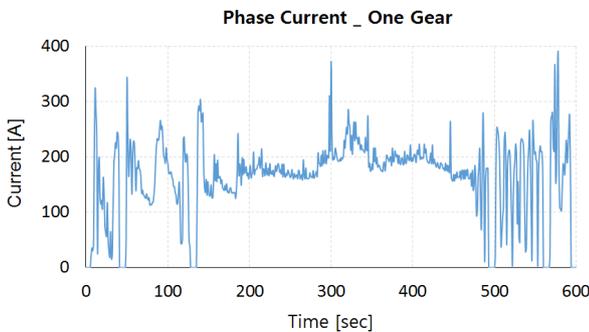


그림. 3 US06 기준 1단 기어 시스템의 전류
Fig. 3 Current of One Gear System based on US06

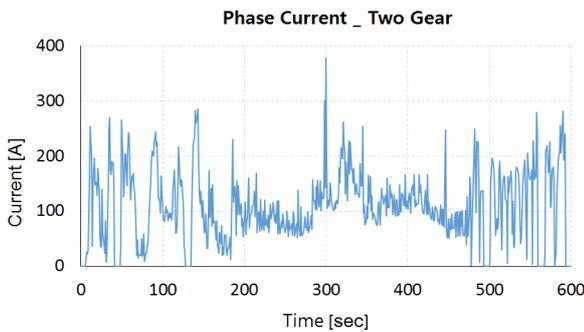


그림. 4 US06 기준 2단 기어 시스템의 전류
Fig. 4 Current of Two Gear System based on US06

2.3 기어 별 전류 및 손실 비교

1단과 2단 기어 시스템의 전류는 그림. 3과 그림. 4와 같다. US06을 기반으로 상전류의 크기를 계산한 결과이며 그림.3 과 그림. 4를 비교할 때 2단 기어 시스템의 전류는 약 200초에서 500초 내에서 150 A 이하의 값을 보이는 반면 1단 기어시스템은 200 A 부근의 상전류 값을 보인다. 300초 부근에서의 값을 제외하고는 2단 기어 시스템은 300 A를 넘지 않는 반면에 1단 기어 시스템은 300 A 이상의 상전류 값을 빈번히 보이고 있다. 그림. 5를 통해서 2단 기어 시스템의 동손이 1단 기어 시스템의 매우 작은 값을 보이며 총 손실을 비교했을 때 2단 기어 시

스템의 손실이 1단 기어 시스템에 비해 적은 양의 손실이 측정된다.

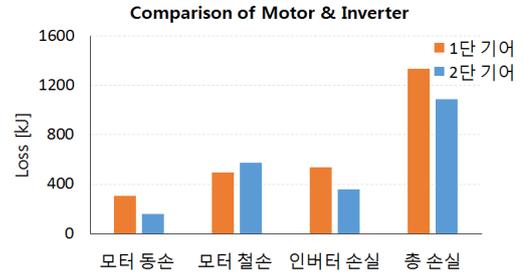


그림. 5 US06 기준 모터와 인버터 손실 비교
Fig. 5 Comparison of Motor and Inverter Loss based on US06

2.4 변속에 따른 효율 분석

변속 시점에 대한 함수를 차량의 속도만으로 선정한 모델의 손실과 변속 알고리즘을 적용한 모델의 손실은 표 1과 같다. 변속 알고리즘의 경우 그림. 2에서 변속 구간을 나타내는 선을 속도와 토크에 대한 함수로 나타내어 토크 값보다 큰 값은 1단 기어비를 적용하고 토크 값보다 작은 값은 2단 기어비를 적용하여 전류를 구하였다. 각각 계산된 전류를 통해 모터와 인버터의 손실을 구하였고 전체 손실의 측면에서 비교하게 되면 평균 손실을 기준으로 약 1.12%의 손실 감소를 보인다.

표 1 변속 시점에 따른 손실 비교

Table 1 Comparison of Loss with respect to Shifting Time

	단순 변속	변속 알고리즘	단위
동손	169.5	158.1	[kJ]
철손	566	572.9	[kJ]
인버터 손실	366.1	358.2	[kJ]
평균 손실	1.836	1.815	[kW]

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차에 적용되는 1단 기어와 2단 기어의 손실 비교를 보여주고 있으며, 손실 저감의 측면에서 2단 기어 사용의 장점을 보이고 있다. 또한 일반 자동차에서 이루어지는 속도에 따른 변속이 아닌 토크와 속도 그리고 효율을 고려한 변속 알고리즘을 제안함으로써 그에 따른 손실 감소를 보여주고 있다.

참고 문헌

- [1] P.J.Kollmeyer, J.D.McFarland, T.M.Jahns, "Comparison of Class 2a Truck Electric Vehicle Drivetrain Losses for Single and Two Speed Gearbox Systems with IPM Traction Machines", 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, pp. 1501-1507, 2015.
- [2] Jung Sung Yoon, "Analytic Approach to Optimal Torque Control of IPMSM using Ferraris Method", POSTECH, Doctoral Dissertation, 2013.