

주행효율 향상을 위한 다단변속기 적용 EV의 변속패턴 최적화

하 영 준 · 민 승 재

한양대학교 미래자동차공학과

Optimization of Gear Shift Schedule in Multi-Speed Transmission for Electric Vehicle to Improve Driving Efficiency

Youngjun Ha · Seungjae Min

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract : This research presents the necessity of applying multi-speed transmission system on electric vehicles to improve driving efficiency. The electric motor can be operated in the high efficiency area by applying the multi-speed transmission. The simulation model of electric vehicle is constructed to evaluate the driving efficiency with the multi-speed transmission and the control logic of gear shift. The optimization of the gear shift schedule is performed by using the Genetic Algorithm to improve the driving efficiency. The result of optimization shows the combined driving efficiency under Urban Dynamometer Driving Schedule and HighWay Fuel Economy Test driving cycle which is 6.58% higher in the 2-speed transmission and 7.91% higher in the 3-speed transmission than the electric vehicle with a single gear transmission.

Key words : Driving efficiency(주행 효율), Electric vehicle(전기자동차), Gear shift schedule(변속 패턴), Optimization(최적화), Multi-Speed Transmission(다단 변속기)

1. 서 론

최근 국제 환경 규제가 심화되는 추세에 따라 사람들의 관심이 친환경 자동차로 집중되고 있다. 친환경 자동차를 활용함으로써 배출가스 감소 효과를 가질 수 있기 때문에 미래의 대체 운송수단으로 활용될 전망이다.

친환경 자동차의 종류에는 하이브리드 자동차와 전기자동차 등이 있다. 그중 전기자동차는 하이브리드 자동차에 비해 최대 항속거리가 부족한 편이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 차량의 중량 저감, 배터리의 용량 증가 등 다양한 방법이 있으며 또한 전기차량에 다단 변속기를 추가함으로써 주행 효율 향상 효과를 기대할 수 있다.

일반적인 단일단 변속기의 전기자동차는 모터 효율 맵 상에서 볼 때 저효율 영역에서 고효율 영역까지 다양한 영역에서 작동하게 된다. 그러나 전기자동차에 다단 변속기를 적용시키게 되면 모터가 고효율 영역에서 작동하게 할 수 있어 배터

리의 에너지 소모를 줄일 수 있고 전기자동차의 주행 효율을 향상시킬 수 있다.^{1,2)}

본 논문에서는 전기자동차 모델에 2단 및 3단 변속기를 추가하여 모델링을 수행한다. 또한 각각의 상황에 따른 변속 로직을 설계하여 다단 변속기를 적용시킨 전기자동차에서 시뮬레이션을 수행한다. 변속 로직에서 설계 인자를 설정하여 도심 주행과 고속주행 사이클의 복합 주행 효율을 최대화시키는 최적화를 진행하여 산출한 결과 값을 단일단 변속기 결과와 비교하여 다단 변속기의 주행 효율 향상 효과를 확인한다.

2. 전기자동차 모델링

전기자동차 모델은 Fig. 1과 같이 상용 소프트웨어인 AMESim의 전기자동차 예제 모델을 활용하였다.³⁾

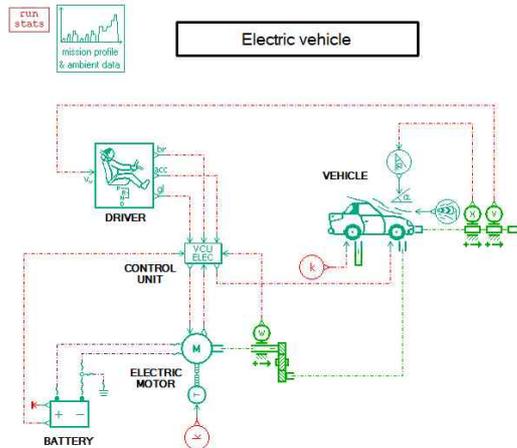


Fig. 1 AMESim 전기자동차 예제

2.1 변속기 모델링

기어와 클러치를 이용하여 다단 변속기의 모델링을 진행하였다. 3속 변속기에 해당하는 모델링은 Fig. 2와 같다.

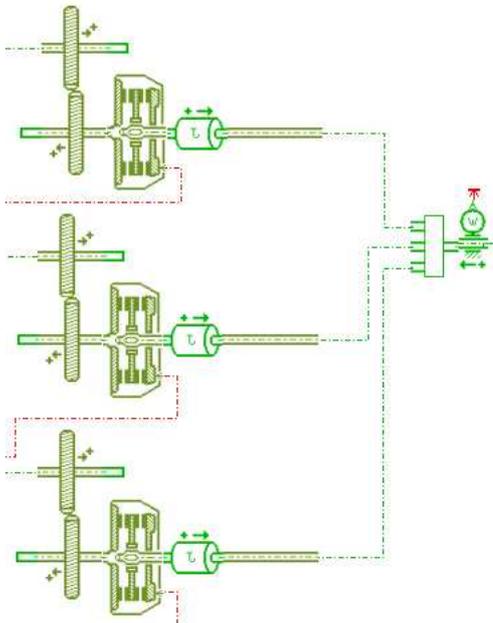


Fig. 2 3속 변속기 모델링

2.2 제어 로직 구성

2.2.1 제어 로직 개념

변속을 판단하는 기준은 차량의 주행 속도와 Throttle Position Sensor(TPS) 신호에 기반하여 차량의 현재 기어 단 수를 결정한다. 본 논문에서는 차속과 TPS 신호의 관계식을 1차식으로 근사하여 변속 제어 로직을 구성하였다. 차속과 TPS 신호에 대한 관계식의 그래프, 즉 기어 변속 패턴은 Fig. 3과 같다.

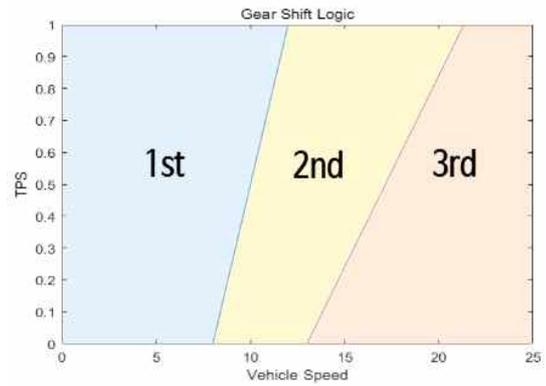


Fig. 3 기어 변속 로직

또한 2단에서 1단으로, 3단에서 2단으로 변속 시 down-shift 로직은 up-shift 로직인 1차식의 차속에 일정한 속도의 offset을 설정하는 방식으로 구성하였다. up-shift, down-shift 로직은 Fig. 4와 같다.

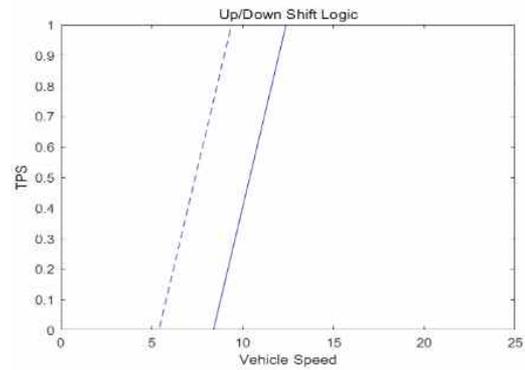


Fig. 4 Up-shift, down-shift logic

1단에서 2단으로 변속 시 차속과 TPS 신호의 관계식의 기울기를 $s1$, x축의 절편을 $ic1$ 으로 정의하고 2단에서 3단으로 변속 시에는 각각 $s2$, $ic2$ 로 정의하였다. 그리고 down-shift 시에 지정한 offset을 각각 $off1$ 과 $off2$ 로 정의하였다. 정의한 변수에 의해 변속 제어 로직을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$TPS \leq s1 \times (Speed - ic1) \quad (1)$$

$$TPS \leq s2 \times (Speed - ic2) \quad (2)$$

$$TPS > s1 \times (Speed - (ic1 - off1)) \quad (3)$$

$$TPS > s2 \times (Speed - (ic2 - off2)) \quad (4)$$

식 (1)부터 식 (4)는 각각 1단에서 2단으로 up-shift, 2단에서 3단으로 up-shift, 2단에서 1

단으로 down-shift, 3단에서 2단으로 down-shift를 의미한다.

2.2.2 변속 제어 로직 구성

상기 언급된 수식을 기반으로 현재 변속단수를 결정하는 변속 제어 로직을 Simulink로 구성하였다. 변속 제어 로직은 Fig. 5와 같다.

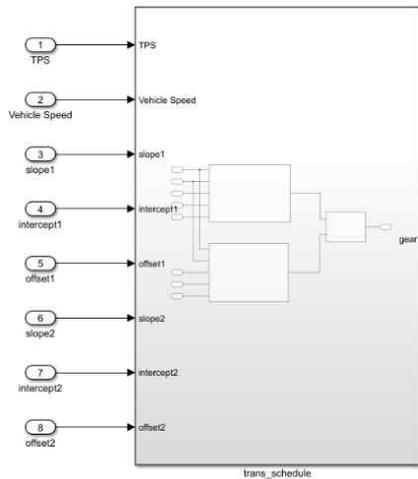


Fig. 5 변속단수 결정 로직

변속 제어 로직은 TPS, 차속, 위에서 언급된 기울기와 x축 절편을 입력 받아 현재의 변속단수를 결정한다. 상세 제어 로직 구성은 Fig.6과 같다.

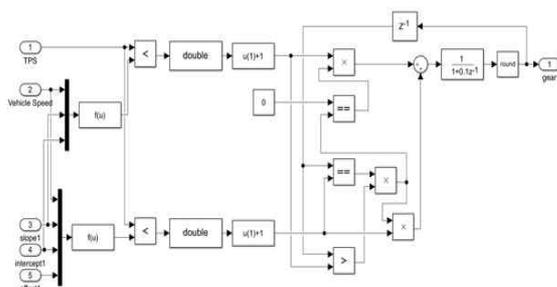


Fig. 6 2속 변속 패턴 로직

현재 변속단수와 up-shift, down-shift 변속 제어 로직 결과 판단된 변속단수를 비교하여 현재 변속단수를 갱신 한다. 필터를 적용하여 up, down-shift 시 지나치게 수시로 변속이 수행되는 것을 방지 하였다. Fig. 6에서 나타내는 것은 1속, 2속 변속 제어 로직이다. 2속, 3속 제어 로직도 위와 마찬가지로 구성된다. 최종적으로 현재 변속단수를 판단하는 로직은 Fig.7과 같다.

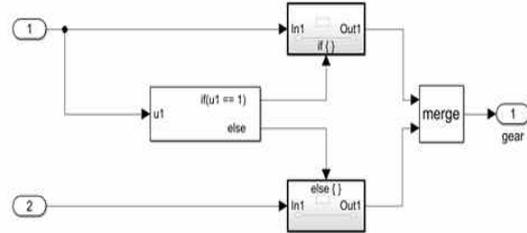


Fig. 7 현재 변속단수 판단 로직

2.2.3 Clutch select module

AMESim 내의 클러치 모델은 신호 0을 입력받으면 접합되고 1을 입력받으면 분리된다. 변속 제어 로직에서 현재의 변속단수를 출력하면 그 값을 입력받아 각 단수에 해당되는 변속기의 클러치를 작동시키는 로직 구성은 다음과 같다.

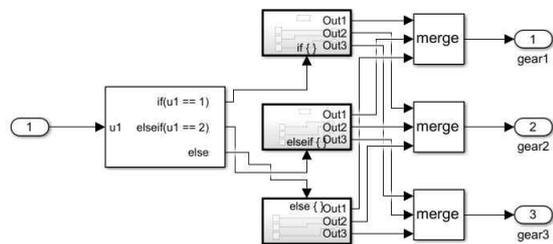


Fig. 8 Clutch select module

현재 변속단수에 해당되는 변속기의 클러치에 신호 0을 출력하고 그 외의 클러치에는 신호 1을 출력하게 된다.

2.3 주행 효율 계산

도심주행, 고속주행의 2가지 주행 사이클의 복합 주행 효율을 계산하기 위해 해당되는 UDDS, HWFET 주행 사이클의 주행 효율에 가중치를 주어 전체 복합 주행 효율을 계산하였다.

$$0.55 \times eff_{UDDS} + 0.45 \times eff_{HWFET} \quad (5)$$

$$eff = \frac{100 \times Distance}{\Delta SOC \times C_{nom} \times Voltage} \quad (6)$$

식 (5)는 EPA (United States Environmental Protection Agency)에 기반 하여 도심, 고속주행의 복합 주행 효율을 계산한 식이다.⁴⁾ 그리고

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

식 (6)은 전기자동차의 주행효율[km/kWh]을 평가하기 위한 계산식이다.

위의 두 계산식을 이용한 복합연비 계산 모듈은 Fig. 9와 같다.

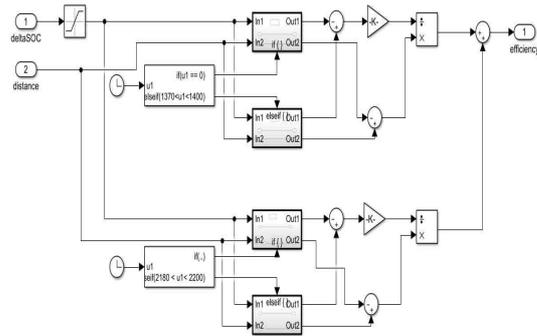


Fig. 9 Combined driving efficiency calculator

SOC 변화량과 주행거리를 입력받아 복합 주행 효율을 출력하는 모듈이다.

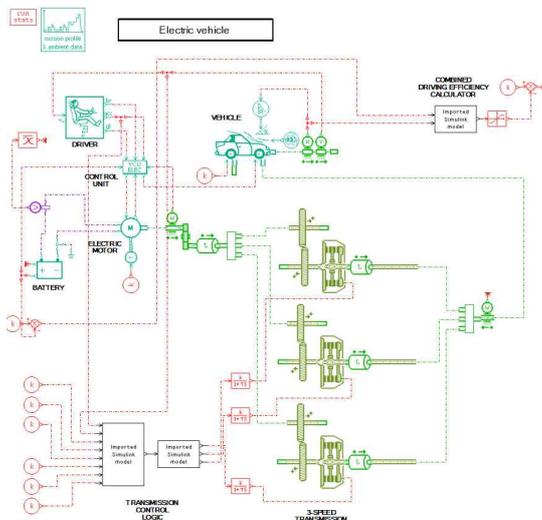


Fig. 10 3속 변속기 적용 전기자동차 모델링

3속 변속기와 제어 로직 및 주행 효율 계산기를 모두 추가한 전기자동차 모델은 Fig.10과 같다.

3. 시뮬레이션 및 최적화 결과

모델링한 전기자동차의 제원 및 주행 사이클은 다음과 같다.

Table 1 전기자동차 제원

구분	제원
총 중량	1445 kg
모터	180 Nm / 11000 RPM
배터리	780 Ah / 310 V
기어 비	1속 : 10 2속 : 15 / 9 3속 : 16.5 / 12.5 / 7.5

Table 2 주행 사이클

프로파일	UDDS + HWFET
평균 속도	46.7 km/h
최고 속도	96.48 km/h
주행 거리	28.52 km
duration	2200 sec

3.1 시뮬레이션 결과

Fig. 10의 3속 변속기 적용 전기자동차의 시뮬레이션의 결과는 다음과 같다.

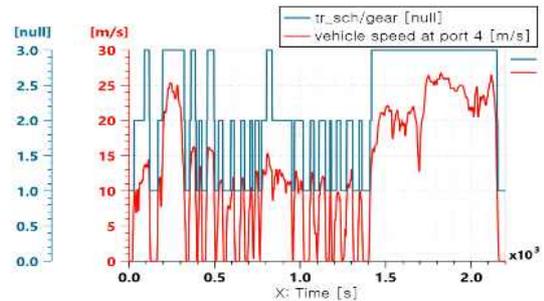


Fig. 11 시간에 따른 차속, 기어 단수

Fig. 11에서 붉은색 그래프는 차속을 의미하고 푸른색 그래프는 현재 기어 단수를 의미한다. 시뮬레이션 결과 차속에 따라 기어 단수가 변함을 확인할 수 있다.

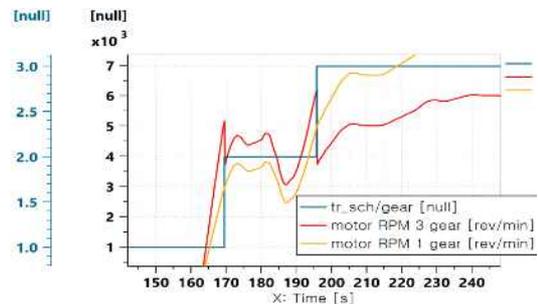


Fig. 12 단일 기어, 3속 변속기 적용 EV의 모터 RPM 및 기

어 단수

Fig. 12에서 붉은색 그래프는 3속 변속기 적용 전기자동차 모터의 RPM, 노란색은 단일단 변속기의 전기자동차 모터의 RPM, 푸른색은 기어 단수를 나타낸다. 그래프를 보면 기어 단수가 변할 때 3속 변속기 적용 전기자동차 모터의 RPM이 급격히 감소 후 다시 증가함을 확인 할 수 있는데 이는 클러치가 분리, 접합 시 나타나는 현상으로 차속에 따라 정상적으로 변속이 수행되고 있음을 나타낸다.

3.2 최적화

최적화는 AMESim 내 Design Exploration Tool의 Genetic Algorithm을 활용하여 수행하였다.

3.2.1 최적화 문제 정식화

최적화 문제 정식화는 2속, 3속 변속기에 대하여 다음과 같이 진행하였다.

maximize

$$0.55 \times eff_{UDDS} + 0.45 \times eff_{HWFET}$$

subject to (3속)

$$0 \leq sl2 \leq 0.5$$

$$0 \leq sl1 - sl2 \leq 0.3$$

$$4 \leq ic1 \leq 9$$

$$3 \leq ic2 - ic1 \leq 6$$

subject to (2속)

$$0 \leq sl \leq 0.8$$

$$8 \leq ic \leq 13$$

목적함수는 도심, 고속주행 2가지 주행 사이클에서의 복합 주행 효율이다. 설계 변수는 위에서 정의한 각각의 기율기와 x축 절편이다.

3.2.2 최적화 결과

Down-shift의 up-shift와의 offset은 상수로써 3 m/s로 일정하게 입력하였다.

최적화 결과 2속, 3속 변속기 적용 전기자동차 각각의 변속 패턴 맵의 기율기와 x 절편은 다음의 Table 3과 같다. 각 최적화 설계 변수가 적용된 변속 패턴 맵은 Fig. 13, 14와 같다.

Table 3 최적화 결과 설계 변수

	sl1	ic1	sl2	ic2
2속	0.34	12.9	.	.
3속	0.49	8.54	0.296	13.5

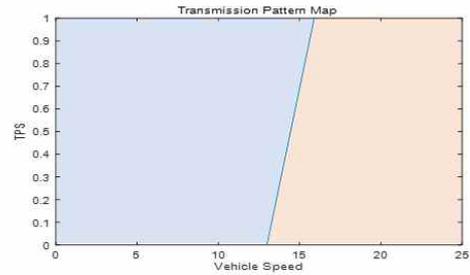


Fig. 13 2속 변속기 적용 EV의 변속 패턴 맵

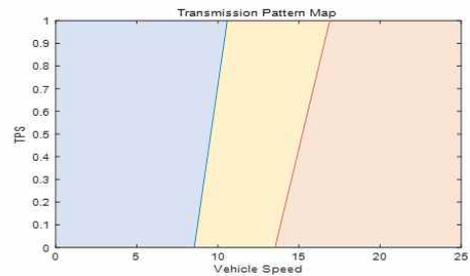


Fig. 14 3속 변속기 적용 EV의 변속 패턴 맵

단일단, 2속, 3속 변속기 적용 전기자동차 각각의 모터 작동점을 모터 효율 맵 상에 투사하면 Fig. 15와 같다.

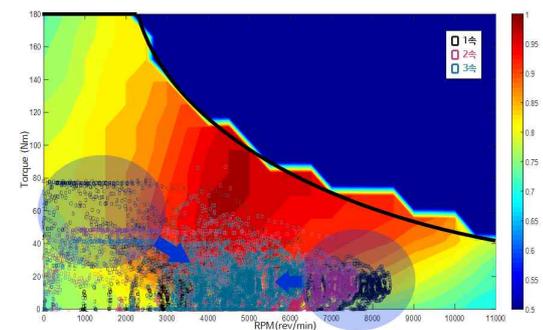


Fig. 15 모터 작동점 및 효율 맵

Fig. 15에서 검은색이 단일단, 자주색이 2속, 푸른색이 3속 변속기 적용 전기자동차의 모터 작동점을 나타낸다. 최적화 결과 단일단일 때 보다 2속 변속기 적용의 경우, 2속 보다 3속 변속기가 적용될 경우 전기자동차의 모터 작동점이 모터 효율 맵 상의 고효율 영역으로 집중되는 것을 확인할 수 있다.

최적화 결과 복합 주행 효율은 Table 4와 같다.

Table 4 최적화 결과 복합 주행 효율

	효율 [km/kWh]	MPGe	증가량 (%)
1속	7.82291	163.8	
2속	8.33788	174.6	6.58
3속	8.44137	176.8	7.91

복합 주행 효율은 2속 변속기 적용 전기자동차의 경우 단일 기어 전기자동차보다 6.58%의 주행 효율이 향상되었고 3속 변속기의 경우 7.91%가 향상되었다.

이를 통해 전기자동차에 다단 변속기를 적용시킴으로써 주행 효율 향상 효과를 가질 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기차량에 2속, 3속 변속기를 적용시켜 차량의 모델링을 진행하였고 변속 패턴 제어 로직을 구성하여 복합 주행 효율을 최대화 시키는 최적 설계 변수를 도출했다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전기자동차 모델은 AMESim의 전기자동차 에 제를 사용하였다. 추가로 2속, 3속 변속기를 모델링 하여 적용 시켰다.

2) 제어 로직 구성은 Simulink로 진행하였다. 변속 패턴 맵의 경우 차속과 TPS에 대한 관계식을 1차식으로 근사 하였다. AMESim의 co-simulation 기능을 이용하여 Simulink로 구성한 제어 로직 모듈을 AMESim으로 불러와 시뮬레이션 및 최적화를 진행하였다.

3) 최적화 결과 전기자동차의 복합 주행 효율이 단일단의 경우와 비교해 2속 변속기를 적용할 경우 6.58%, 3속 변속기를 적용할 경우 7.91% 향상되었다.

References

1) Zhou, X., Walker, P., Zhang, N., and Zhu, B., "Performance Improvement of a Two Speed EV through Combined Gear Ratio and Shift Schedule

Optimization," SAE Technical Paper 2013-01-1477, 2013

2) Z. ZHANG, C. ZUO, W. HAO, Y. ZUO, X. L. ZHAO and M. ZHANG, "THREE-SPEED TRANSMISSION SYSTEM FOR PURELY ELECTRIC VEHICLES", Int. J. Automotive Technology, Vol. 14, No. 5, pp. 773-778 (2013)

3) <http://www.plm.automation.siemens.com>

4) <http://www.epa.gov>