

하이브리드 전기자동차에서 직류 전압 수준에 따른 전력변환시스템의 효율 분석

이진혁¹, 백성훈², 김상훈¹
 강원대학교¹, 현대 로템²

Efficiency analysis of the power conversion system in a hybrid electric vehicle according to DC operating voltage level

Jin Hyeok Lee¹, Sung Hoon Back², Sang Hoon Kim¹
 Kangwon National University¹, Hyundai Rotem²

ABSTRACT

본 논문에서는 73kW IPMSM으로 구동되는 직렬 하이브리드 전기자동차 구동시스템에서 직류 전압의 운영 수준에 따른 전력변환시스템의 효율을 분석하였다. 여러 직류 전압 수준에 대한 배터리, 커패시터 및 3상 인버터의 손실을 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 분석하여 효율을 알아보았다. 직류 동작 전압을 증가시키면 배터리와 커패시터에서의 손실은 감소하지만, 인버터의 손실은 도통 손실과 스위칭 손실의 변동정도에 따라 달라진다. 분석 결과로 $300V_{dc}$ 에서 $600V_{dc}$ 로 직류 전압 운영 수준을 증가시키는 경우에 전력변환시스템의 효율은 증가하는 것을 확인하였다.

1. 서론

배터리의 제한된 에너지 저장용량으로 인해 최근 화석 연료를 사용하는 자동차와 순수 전기자동차의 중간 단계인 HEV(Hybrid Electrical Vehicle)가 주목받고 있다^[1]. 엔진, 발전기, 배터리, 인버터, 구동 전동기의 직렬 구성인 직렬 HEV의 동력 시스템에서 직류 전압의 운영 수준(DC voltage operating level)은 시스템의 여러 성능에 영향을 준다. 통상적으로 산업용 전동기 구동시스템에서의 직류 전압은 $300V_{dc}$ 정도가 사용된다^[2]. 그러나 배터리로 공급되는 직렬 HEV에서는 직류 전압 운영 수준 선정의 자유도가 있으며 그 운영 전압의 크기에 따라 시스템의 효율, 신뢰성, 비용, 크기 등이 달라질 수 있다. 따라서 배터리를 사용하는 HEV의 동력 시스템에서 직류 전압의 적절한 운영 수준 선정은 매우 중요한 설계 요소가 된다. 시스템의 동작 전압을 상승시키는 경우 동작 전류의 감소로 손실 감소를 기대할 수 있기 때문에 최근 HEV에서는 직류 전압의 운영 수준을 증가하려 하고 있다^[3].

본 논문에서는 73kW IPMSM으로 구동되는 직렬 HEV에서 직류 전압의 운영 수준이 전력변환시스템의 효율에 미치는 영향을 알아보았다. 통상적으로 사용되는 전압 수준인 $300V_{dc}$ 와 $600V_{dc}$ 의 높은 동작 전압 수준을 사용하는 경우에 대해 전력변환시스템의 손실을 분석하여 동작 전압 상승에 따른 시스템의 효율 변동 특성을 분석하였다.

2. 본론

2.1 HEV 구동용 전력변환시스템

본 논문에서 분석하고자 하는 HEV 구동을 위한 전력변환시스템의 구성이 그림 1에 보인다. 시스템은 배터리, 커패시터, 3상 PWM 인버터로 구성된다.

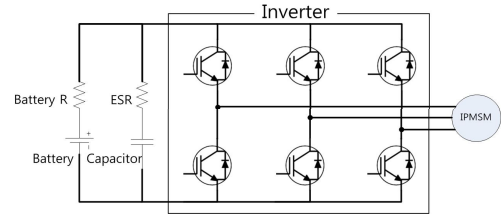


그림 1. HEV 구동용 전력변환시스템 구성

구동 시스템 각 부분에서의 손실은 다음과 같다.

2.2 배터리 손실

배터리에서 발생하는 손실은 다음과 같이 내부저항 R_{in} 과 동작 전류의 제곱에 비례한다.

$$P_{battery} = i^2 R_{in} \quad (1)$$

2.3 커패시터 손실

커패시터의 손실은 다음과 같이 내부의 등가직렬저항 R_{ESR} 과 충·방전 전류의 리플 성분의 제곱에 비례한다.

$$P_{capacitor} = i_{ac}^2 R_{ESR} \quad (2)$$

2.4 인버터 손실

인버터의 손실은 IGBT와 Diode에서의 도통 손실과 스위칭 손실로 구성된다. IGBT의 도통 손실 P_{cond} 는 다음과 같다^[4].

$$P_{cond} = \frac{1}{2} (V_{CE0} \frac{I_0}{\pi} + r_{CE} \frac{I_0^2}{4}) + m_a (V_{CE} \frac{I_0}{8} + \frac{1}{3\pi} r_{CE} I_0^2) \quad (3)$$

여기서 V_{CE0} 는 포화 전압, r_{CE} 는 IGBT 도통 저항, I_0 은 도통 전류, m_a 는 전압 변조지수이다. IGBT의 스위칭 손실 P_{sw} 는 다음과 같다.

$$P_{sw} = f_{sw} (E_{on} + E_{off}) \frac{V_{dc}}{V_{dashed}} \quad (4)$$

여기서 E_{on} 과 E_{off} 는 각각 스위치 On/Off시에 발생하는 손실이며, V_{dashed} 는 기준전압이다. Diode에 대한 손실도 IGBT와 유사하게 구할 수 있다^[4].

3. 시뮬레이션

손실 분석은 그림 2에 보이는 구동시스템의 블록도에 대해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 수행하였다. 동작 전압 수준은 300, 400, 500, 600 V_{dc}로 설정하였다. 시스템 사양은 표 1에 보이는데, 인버터에 사용되는 스위칭 소자로는 동작 전압에 적합한 정격을 갖는 Infineon사의 IGBT를 적용하였다. Data sheet에서 주어진 스위칭 소자의 V_{ce}, E_{on} & E_{off}의 특성 곡선을 직접 적용하여 운전 전압과 전류에 따른 손실을 분석하였다. 동작 전압 수준에 맞는 구동 전동기를 사용하는 대신에 인버터의 부하로는 유도성 부하를 적용하였는데, 여러 운전조건에 대해 구동 전동기가 요구하는 것과 동일한 전압과 전류를 출력하도록 정수 값을 조절하였다. 인버터의 제어는 공간전압 벡터 PWM 기법을 사용하였으며, 스위칭 주파수는 8kHz이다.

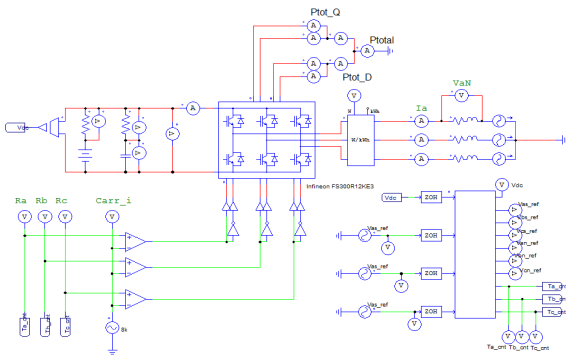


그림 2. 시뮬레이션 블록도

표 1. 시뮬레이션 파라미터

| | |
|--------|--|
| 배터리 | 리튬폴리머 (R_{in} 7mΩ) 268V |
| 커패시터 | 필름 커패시터 1135μF (R_{ESR} 5mΩ) |
| 인버터 소자 | 300 V _{dc} : FS800R07A2E3(정격 650V, 800A) |
| | 400 & 500 V _{dc} : FS400R12A2T4(정격 1200V, 400A) |
| | 600 V _{dc} : FS300R12KE3(정격 1200V, 300A) |

표 2와 그림 3에 73kW 정격 출력 시의 특성이 보인다. 전체적인 손실 중에 인버터 손실이 가장 크며 다음으로 배터리 손실이 크다. 동작 전압이 증가함에 따라 인버터 손실에서 도통 손실은 감소하고, 스위칭 손실은 증가한다. 도통 손실의 감소보다 스위칭 손실의 증가가 크므로 인버터의 총 손실은 증가하여 인버터 효율은 동작 전압이 증가하면 감소하게 된다. 400과 500 V_{dc}에 사용된 스위칭 소자에 대해서는 이러한 현상이 좀더 크게 나타난다. 그러나 사용된 스위칭 소자의 특성에 따라 이 결과는 달라질 수 있다. 동작 전압 증가에 따른 도통 손실 감소보다 스위칭 손실 증가가 작은 소자를 사용한다면 오히려 전체 인버터 손실이 감소할 수 있다. 따라서 동작 전압에 최적화된 특성을 가진 스위칭 소자를 선정하는 것이 시스템 효율 향상에 매우 중요하다. 이러한 결과는 그림 4에 보이는 1/2 정격 출력에 대해서도 동일하게 나타난다. 배터리와 커패시터의 손실은 동작 전압 증가에 따라 감소하므로, 전력변환시스템의 총 손실은 동작 전압 수준 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 300 V_{dc}와 600 V_{dc}의 동작 전압 시의 특성을 비교하면 비록 두 경우에 사용된 스위칭 소자는 다르지만 인버터만의 효율은 300 V_{dc}에서 가장 좋은 반면에 전력변환시스템의 총 효율은 600 V_{dc}의 경우가 가장 우수함을 알 수 있다.

표 2. 정격 출력 시 손실 및 효율(73kW)

| 직류 전압 | 300 V _{dc} | 400 V _{dc} | 500 V _{dc} | 600 V _{dc} |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 출력전류 | 470A | 352A | 280A | 233A |
| 스위칭손실 | 660.4W | 1147.5W | 1222.1W | 1156.8W |
| 도통손실 | 1050.1W | 1005.9W | 737.2W | 628.3W |
| 배터리손실 | 639.9W | 361.0W | 229.1W | 159.0W |
| 커패시터손실 | 57.0W | 31.7W | 20.0W | 13.8W |
| 인버터 효율 | 97.71% | 97.14% | 97.39% | 97.61% |
| 전체 효율 | 96.81% | 96.63% | 97.06% | 97.39% |

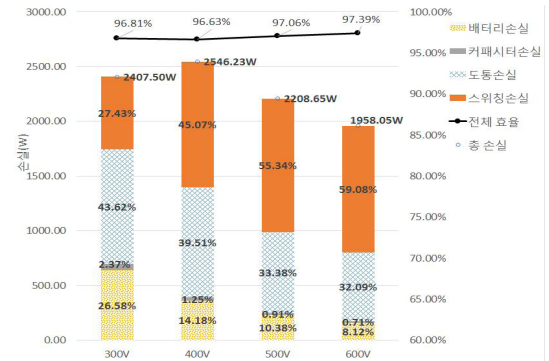


그림 3. 정격 출력에서의 손실 및 전체 효율



그림 4. 1/2 출력에서의 손실 및 전체 효율

4. 결론

본 논문에서는 직렬 하이브리드 전기자동차 구동시스템에서 직류 동작 전압의 수준에 따른 전력변환시스템의 효율을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 직류 전압 수준이 증가함에 따라 인버터 손실은 증가하고 배터리와 커패시터 손실은 감소하는데, 결과적인 총 손실은 감소하여 효율이 증가한다. 그러나 이 결과는 사용된 스위칭 소자의 특성에 매우 의존적이므로 효율 향상을 위해서는 동작 전압에 최적화된 특성을 가진 스위칭 소자를 사용할 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] 권태석, 이현동, “그린카 구동용 인버터 기술 동향”, 전력전자학회지 제14권 제4호, pp.28-32, 2009.
- [2] 김상훈, 모터 제어 DC, AC, BLDC, 7장, 2014.
- [3] Susan A. Rogers, “Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System”, 2006.
- [4] Infineon, “IGBT Power Losses Calculation using the Data Sheet Parameters”, 2009.