http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2016.21.5.381

하이브리드 자동차용 모터 및 인버터 최신 동향 분석

김성진[1], 홍승민[1], 남광희†

Recent Progress Trend in Motor and Inverter for Hybrid Vehicle

Sung-Jin Kim[1], Sueng-Min Hong[1], and Kwang-Hee Nam†

Abstract

Many efforts have focused on the improvement of power density and efficiency by downsizing the motor and inverter. Recently, Toyota, Honda, and GM realized that the compact-sized motor uses the hairpin structure with increased space factor. Reducing the maximum torque from high-speed technique also makes it possible to design the high-power density model. Toyota and Honda used the newly developed power semiconductor IGBT to decrease conduction loss for high-efficiency inverter. In particular, Toyota used the boost converter to increase the DC link voltage for high efficiency in low-torque high-speed region. Toyota and GM also used the double-sided cooling structure for miniaturization of inverter for high-power density.

Key words: Power density, Hair-pin structure, Conduction loss, DC-link voltage, Double sided cooling

1. 서 론

본 논문에서는 SAE International[1]-[7]과 IEEE 논문[8],[9]을 바탕으로 최근 Toyota, Honda, GM의 모터 및 인버터 개발 동향을 분석하였다. 기본적인 개발 방향은 효율을 증대 시키는 가운데 토크 밀도와 전력밀도를 높여 소형화 및 경량화를 추구하는 것이다. 모터의 경우 헤어핀 권선을 사용하여 슬롯 점적률을 높이고, 고속화하여 전력밀도를 높였다. 또한 인버터의 경우 이중냉각(double sided cooling) 방식을 채택하여 방열판의 크기를 줄이고 기생 인덕턴스를 줄여 DC 링크 캐패시턴스를 감소시켰다.

2. 모 터

차세대 하이브리드 차량에 사용되는 모터의 특징은 소형화 및 경량화를 통해 전력밀도와 연료효율을 증가시키는 것이다. 모터 권선의 개선과 모터의 고속화 그리고 냉각방식의 개선 등으로 모터 소형화 및 경량화 할 수 있었다. 최근 Toyota와 Honda 그리고 GM에서도 앞서 언급했던 방법을 포함한 다양한 방식을 통해 모터의 경량화를 위한 노력이 있었다.

2.1 헤어핀권선의 사용으로 인한 점적률 증대

고정자에서는 티스 폭과 슬롯의 면적이 항상 경쟁적 입장을 가진다. 티스 폭을 작게 하면 권선 발열은 줄일 수 있으나 자속밀도가 증가하여 철손이 증가하게 되고, 반대로 슬롯의 면적을 작게 하면 자속밀도는 떨어지나 코일의 전류밀도가 높아져서 동손이 증가 된다. 일반적 전기 차 모터에 있어서의 티스의 최대 자속밀도는 1.8 Tesla, 코일의 최대 전류밀도는 $18A/mm^2$ 정도로 잡는다. 그러면 저속영역에서는 동손이 전체 손실의 약 80%를 차지하게 된다. 고정자 외경을 키우지 않고 토크를 증대시키는 한 방법이 점적률을 높이는 것이다.

스트렌디드 (stranded, 다중) 권선을 사용하면 최대 점적률 (나동기준)을 48 % 이상 설계하기 힘들다. 그러나 헤어핀 (hair pin) 방식을 사용하면 슬롯 점적률을 60~70 % 로 높일 수가 있다. 또한 엔드턴의 높이를 낮출 수 있고, 복잡한 코일 삽입기 (coil insertion machine)를 사용하지 않고 공정을 (반)자동화시킬 수 있다. 이러한 장점 때문에 GM (Remy)은 Chevrolet Volt에 오래 전부터 헤어핀 권선 방식을 사용하였다. (그림 1 참조) 이러한 경향을 Honda[2] 및 Toyota[3] 에서도 최근에 채택하였다.

Paper number: TKPE-2016-21-5-2
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: kwnam@postech.ac.kr
Dept. of Control & Motor Drive Lab., Postech.
Tel: +82-54-279-5628 Fax: +82-54-279-5629
[1] Dept. of Control & Motor Drive Lab., Postech.
Manuscript received Aug. 10, 2016; revised Aug. 22, 2016; accepted Aug. 29, 2016

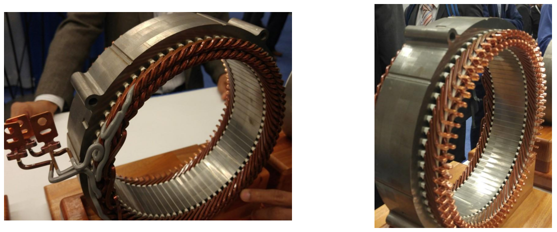

Fig. 1. Volt stator with hair pin. (a) front side, (b) back side with welding.

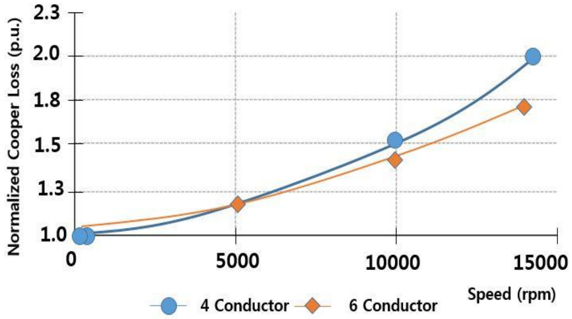

Fig. 2. Normalized joule loss of a four-conductor per slot design vs a six-conductor per slot design[1].

그러나 헤어핀 방식은 구리를 자동 설비로 용접해야 하고, 절연 처리해야 하는 공정상의 복잡성이 있고, 많은 특허가 걸려 있다[11],[12]. 헤어핀 권선에 있어 다른 큰 이슈는 코일의 AC 저항이 크다는 점이다. 슬롯 내 권선에는 슬롯 누설자속이 통과되고, 코일 사이에 proximity 효과 때문에 전류가 코일 단면적에 골고루 흐르지 않고 주로 표피만을 통해 흐르기 때문에 유효 도통 단면적이 작아진다. 이들은 기본적으로 와전류 효과 (eddy current effect)에 의한 것이다. 따라서 주파수의 제곱에 비례하기 때문에 저속에서는 크게 문제 되지 않으나, 고속에서는 심각해질 수 있다. Chevrolet Volt의 경우 초기에는 슬롯 당 4개 헤어핀을 사용하였지만 이후에 슬롯 당 6개 (점적률 70%)를 사용함으로써 고속 영역에서 모터의 동손을 감소시켰다[1](그림 2 참조).

AC 손실 문제는 GM[13]에서 심각하게 조사하였다. 그 논문에 의하면 헤어핀 권선이 저속에서는 유리하고, 고속 시에는 불리하나 driving cycle을 놓고 볼 때 헤어핀이 효율 면에서 더 우수하다고 결론을 내리고 있다.

Honda의 경우 이전 세대 모델에서 스트렌디드(Stranded) 권선을 사용하였지만, 최근에 출시된 2016년형 Odyssey모델에서는 헤어핀을 슬롯 당 8개를 삽입하여 모터의 부피를 줄이고 고정자 코어의 점적률을 48%에서 60%로 증가시켰다[2]. 또한 bus bar 및 epoxy resin power coating 엔드 코일에 적용하여 이전 모델 대비 모터의 부피 및 무게를 23% 감소시켰다[2].

Toyata 역시 헤어핀구조를 적용하여 이전 모델인 P410과 비교하여 점적률을 15% 높이고 기계적 손실은 20%, 무게는 21% 감소시켰다[3].

TABLE I
IMPROVEMENTS OF TOYOTA HYBRID TRANSAXLE[3].

Transaxle		P610(4th)	P410(3rd)
Vehicle Class		Compact	
모터	Type	Synchronous AC motor	
	Max. Power (kW)	53	60
	Max. Torque(Nm)	163	207
	Max. Speed (rpm)	17000	13500
Reduction Gear Ratio		10.835	8.612
Weight (kg)		-5.6	-
Overall Length (mm)		-47	-

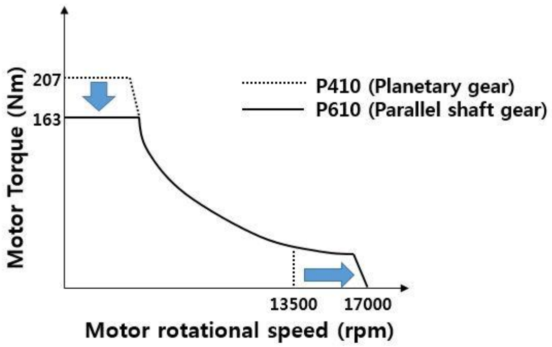

Fig. 3. Toyota P610 motor downsizing through gear ratio increase[3].

2.2 고속화를 통한 모터의 크기 감소

Toyota의 제 3세대 모델인 P410는 유성 기어를 사용한 반면에 제 4세대 모델인 P610에서는 병렬 기어 샤프트를 사용하였다. 표 1에 기술된 바와 같이 총 기어 감속비 (모터-바퀴)가 8.612에서 10.8335로 증가되었다.

총 기어 감속비 증가로 인해 모터의 최대 토크를 207Nm에서 163Nm로 감소시킬 수 있었으며, 이를 통해 P610 모터의 부피를 20% 감소시킬 수 있었다[3]. 그러나 최대 속도는 13500rpm에서 17000rpm 으로 증가되었다. 그림 3은 P410과 P610 의 토크-속도 곡선을 비교하여 보여 주고 있다.

2.3 Volt의 병렬 구조 변화를 통한 모터크기 감소

GM사의 2세대 Volt 에서는 hybrid architecture가 변화되었다. 제 1세대 Volt 에서는 모터 B가 저속에서 단독 운전하고, 고속에서만 모터 A와 B가 병렬 운전하도록 되어 있었다(그림 4 참조).

모터 A는 고속운전에 최적화 설계되었었고, 모터 B의 효율이 감소하는 고속 구간에서 모터 A가 보조하는 방식을 채택하였다.

1세대 와 2세대 EV Mode를 비교한 토크-속도 곡선이 그림 5에 나타나 있다. 왼쪽 그래프에 해당하는 1세대 EV Mode의 경우 모터 B가 먼저 동작하여 차속이 90 kph를 넘어서면 모터 A가 보조 동작을 한다. 모터

(a) (b)

Fig. 4. GM Volt motor (a) motor A, (b) motor B.

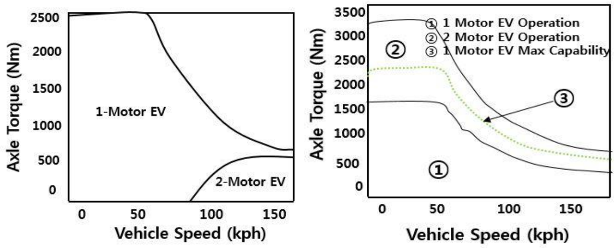

Fig. 5. Comparison of 1st and 2nd generation Volt EV modes[4],[8].

B가 저속에서 홀로 동작하기 때문에 큰 부피를 필요로 했었다. 오른쪽 그림에 해당하는 2세대 EV Mode의 경우 모터 A와 모터 B가 모든 속도 구간에서 병렬운전이 가능하다. 따라서 1세대에 비해 모터 B의 필요 토크와 전류가 감소하고 이로 인해서 모터 B를 작게 설계 할 수 있었다[4],[8]. 표 2에 나타나 있는 것처럼 1 세대 최대 토크 370Nm 이나, 2 세대의 최대 토크 280Nm로 감소되었다. 또한 무게가 약 40% 감소하면서 토크 밀도는 50% 증가하였다. 하지만 모터 B의 최고속도는 9500rpm에서 11000rpm으로 증가하였다[4].

다음으로 1세대와 2세대의 ER Mode(extended range mode)를 비교하면 1세대 ER Mode에서는 모터 B가 먼저 동작하고 높은 토크와 고속이 필요할 때 엔진과 모터 A가 동작한다. 2세대 ER Mode에서는 저속이나 작은 토크가 필요할 때에 모터 B로만 동작이 가능하다. 1세대 ER Mode와는 다르게 시스템 손실이 최소화되는 모드로 동작하는 것이 특징이다[4],[8].

또한, 모터의 부피 및 무게는 감소하였지만 차량의 전력 밀도 증가로 인해 그림 6에서 보는 바와 같이 차량 가속력은 전 구간에서 증가하였다[4].

2.4 모터 냉각방식 및 영구자석

Toyota의 4세대 P610은 엔진에 의해 구동되는 펌프를 사용하며 ATF(automatic transmission fluid) 오일을 분사하여 코일에 앤드턴을 냉각시킨다. 기어를 사용하여 펌핑 하는 3세대 P410의 냉각방식과 비교했을 때 냉각 효율을 증가시켰고 이를 통해 3세대 P410 대비 희토류 사용을 85% 줄였다[3].

GM은 영구자석의 내열성을 증대시키는 용도로 사용되는 Dysprosium을 drain boundary diffusion 방식을 사용하여 희토류 사용량을 80% 줄였다. 또한 Motor A에 희토류 자석 대신에 Ferrite 자석을 사용하여 제 1 세대 대비 Nedymium 사용량을 50% 감소시키었다[9]. Ferrite의 저온 감자를 피하기 위하여 Motor A의 최대 전류를 정격전류의 120% 이하로 제한하는 것으로 알려지고 있다.

TABLE II
VOLT GEN.1 AND GEN. 2 DRIVE UNIT SPECIFICATION[4].

	GEN 1	GEN 2
Gear ratio, EV mode	A: 1.45 B: 3.24	A: 2.87 B: 3.077
Modes, engine on	2	3
Fianl drive arrangement	평행기어 감속	체인과 유성기어를 이용한 감속
Motor A type	집중권, NdFeB 자석	분포권 헤어핀, Ferrite 자석
Motor A peak torque / power	186 / 55	118 / 48
Motor B tye	분포권 헤어핀, NdFeB 자석	분포권 헤어핀, NdFeB 자석
Motor B peak torque / power	370 / 111	280 / 87
Effective fianl drive ratio	2.16	2.64
Power electronics	분리된 고정방식	결합된 방식
Total system mass (kg)	164	119

Fig. 6. Comparison of Volt vehicle acceleration vs speed[4].

3. 인버터

PCU(power control unit) 역시 경량화 및 소형화를 통해 전력밀도를 높이는 추세이다. 주로 파워 반도체 소자인 IGBT의 구조 및 냉각방식의 개선, 그리고 DC 링크 캐패시턴스 용량의 감소 등과 같은 방식으로 고효율, 고 전력밀도의 PCU를 설계하고 있다.

Fig. 7. Volt 2nd generation inverter.

TABLE Ⅲ
INVERTER SPECIFICATIONS OF 1st AND 2nd GEN. VOLT INVERTER[5].

PARAMETERS	VOLT-1 INVERTER		VOLT-2 INVERTER	
	INV-A	INV-B	INV-A	INV-B
Max Phase Current (Arms)	220	430	325	325
Max AC Power (kW)	55	111	48	87
Max Fundamental Freq (Hz)	800	950	800	1200
Continuous Phase Current (Arms)	150			
HV DC Voltage V (peak), V (nominal)	430, 360			
Coolant Temperature (°C)	75			
Flowrate (L/minute)	10			
Max AC Power (kVA)	221		180	
Power Density(kVA/L)	16.9		17.3	
Power Density(kVA/kg)	15.14		21.69	
TPIM Mounting / AC Cable	Body /External AC cable		Transmission/ Internal Bus	

3.1 GM Volt PCU의 전력밀도 개선

GM의 경우 Volt 2세대 인버터 모듈 (그림 7 참조)에서 엔진과 두 개의 전기모터 사이의 전력 흐름을 최적화 하여 drive unit의 최대 순시 교류 파워를 221kVA에서 180kVA로 약 19% 감소시켰다.

세부적으로 살펴보면, 모터 B의 토크 감소에 따라, 인버터 B또한 최대 상전류는 430Arms에서 325Arms로 약 24% 감소시켰다. 그러나 모터 A는 ferrite를 사용한 PM assisted synchronous reluctance 모터이다. 따라서 이전의 동기전동기 (IPMSM) 대비 전류사용량이 220Arms에서 325Arms로 약 48% 증가되었다. 따라서 표 3에 나타난 바와 같이, Volt-2의 경우는 모터 A와 B의 인버터가 동일 전류사양을 갖게 되었고, 이러한 두 인버터의 동일화는 생산성 및 재고 관리에 커다란 이점을 가져다 준다[5].

3.2 Honda Odyssey의 전력밀도 개선

Honda Odyssey PCU는 소형화 및 경량화를 통한 전력밀도 증가와 에너지 손실 저감을 통한 연비상승을 이루고 있다. PCU 2세대는 캐패시터와 전력 반도체의 개선을 통하여 1세대 PCU에 비해 23%만큼 부피를 감소시켜, 전력밀도를 34.8 kVA/L에서 43.6 kVA/L로 25.2% 증가시킬 수 있었다[6]. 구체적인 2세대 Honda odyssey PCU의 개선사항은 표 4를 통해 확인할 수 있다.

TABLE Ⅳ
COMPARISON OF HONDA PCU 1st AND 2nd GEN[6].

		GEN 1	GEN 2
HEV system	Max. Torque(Nm)	307	315
	Max. output(kW)	124	135
PCU	Max. output(kVA)	400	388
	Max. boost voltage(V)	700	700
	Max. current (Arms)	330	320
	Generator max current (Arms)	155	155
	Weight(kg)	17.4	14.3
	Volume(L)	11.5	8.9
	Power density (kVA/L)	34.8	43.6

TABLE Ⅴ
TOYOTA GEN 3 AND GEN 4 POWER CONTROL UNIT SPECIFICATION[7].

	GEN 3	GEN 4
Max total output(kVA)	177.8	162.2
Max boost voltage(V)	650	600
Motor Max current(Arms)	170	180
Generator max current (Arms)	88	75
Weight(kg)	13.5	11.9
Volume(L)	11.2	6.8
Max output density (kVA/L)	15.9	23.7

3.3 Toyota Prius의 전력밀도 개선

Toyota는 개선된 구조의 이중냉각 방식을 적용하고, IGBT의 효율을 높여 PCU의 경량화를 이루었다. 또한 캐패시터 필름 소재의 개선과 버스 바의 기생 인덕턴스 성분을 최소화하는 구조 설계를 통해 캐패시터 용량을 감소시켰다[7]. 이러한 개선사항으로 인하여 Toyota 4세대 Prius PCU에서 최대 출력 전력밀도를 15.9 kVA/L에서 23.7 kVA/L로 이전세대 모델에 비해 대략 50%정도 증가 시킬 수 있었다. 구체적인 Toyota Prius에 개선사항은 표 5를 통해 확인해 볼 수 있다.

3.4 구조개선을 통한 IGBT 손실 저감

Honda에 경우 캐리어 저장 영역에서 반도체 표면과 전극을 floating 시킴으로써 캐리어 저장 효과를 향상 시켰다. 이를 통해 conductivity modulation effect가 증가하여 스위치 on 상태에서 전도손(conduction loss)이 감소하였다[6]. 또한 추가적인 개선 사항으로는 Miller feedback capacitor를 감소시킴으로써 방전 시간을 단축 시켰고 따라서 스위치 turn-on시간을 단축시킬 수 있었다. 이러한 개선을 통해 IGBT의 스위칭손실을 10%, 전도손을 1% 감소 시킬 수 있었다. IGBT뿐만 아닌 FWD(free wheeling diode)역시 개선하였는데, 스위치 turn on 구간에서의 서지 전압 (surge voltage)을 줄이기 위하여 애노드와 캐소드의 dopant profile을 최적화하는 방법으로 reverse recovery charge (Qrr)을 감소시켰다. 이를 통해 FWD의 reverse recovery loss를 30% 개선 시켰다[6].

Toyota에서는 IGBT에 콜렉터와 에미터 사이에 super body layer라는 N형 반도체 층을 삽입하여 콜렉터에서 에미터로 넘어오는 캐리어수를 줄임으로써 콜렉터 측에 정공 밀도를 높이는 방식을 사용하였다. 이를 통해 이전 3세대 모델에 비해 16%의 conduction loss를 줄일 수 있었다[7]. GM의 경우는 IGBT wafer의 두께를 56% 줄이고 스위칭 손실은 53%를 줄였다[5].

3.5 냉각 방식의 개선을 통한 경량화

PCU의 junction 온도는 PCU의 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 냉각방식을 개선하는 것은 모듈의 경량화를 통한 전력밀도의 개선과 더불어서 내구성 및 견고성을 높이는 중요한 요소이다.

Toyota에서는 Prius 3세대에 사용했던 단면 냉각방식을 버리고, 4세대에서 이중 냉각 방식을 사용하였다. Prius 4세대에서는 이중 냉각용 IGBT를 이른바 2 in 1 구조로 만들어 사용하였다. 즉 인버터 한 arm을 구성하는 상하 2개의 IGBT와 2개의 FWD를 하나의 package로 만들었다. 이를 통해 한 arm에 상단과 하단에 wiring을 제거함으로써 22%의 물리적 크기의 감소와 55%의 인덕턴스를 감소시킬 수 있었다[7].

GM 역시 마찬가지로 2세대 Volt에서 1세대와 달리 이중냉각방식을 사용하여 IGBT의 wafer의 두께를 56%만큼 감소시키고 크기를 38%만큼 감소시킬 수 있었다. 또한 heat sink에 열전도율이 높은 copper를 주입하여 열 저항 값을 34% 줄이고 냉각성능을 높일 수 있었다[5].

Honda의 2세대 PCU 모듈은 1세대와 동일한 단면 냉각방식을 사용하였으나 heat sink의 두께를 줄임으로써 열 저항을 29% 감소시켰다. 이에 따라 전력반도체 칩의 크기와 heat sink의 무게를 줄일 수 있었다[6].

3.6 캐패시터의 용량감소를 통한 부피 축소

인버터에서 전력밀도를 높이기 위해서 캐패시터의 경량화는 매우 중요한 요소 이다. Toyota에서는 캐패시터 모듈에 기능적 결합을 통해 PCU의 부피와 크기를 줄였다. 먼저 DC 링크 버스 바와 smoothing (snubber) 캐패시터를 결합하고, 필터 캐패시터 역시 signal line connector와 결합하여 모듈의 크기를 줄였다. Sunbber 캐패시터가 일체화된 버스 바는 DC 링크의 ESL (equivalent series inductance)을 효과적으로 줄였고, 이로 인해 DC 링크 캐패시터의 리플 전류가 감소하여 DC 링크 캐패시터 용량을 줄이는 데 일조하였다. 또한 두께가 얇은 신형 폴리프로필렌 필름을 이용하여 캐패시터의 용량을 줄임으로써 캐패시턴스와 ESL을 각각 34%, 58% 줄일 수 있었다[7].

TABLE Ⅵ
COMPARISON OF VOLT-1 AND VOLT-2 BULK CAPACITANCE[5].

		Volt - 1	Volt - 2
Bulk Cap	Film Thickness (um)	2.8	2.5
	Min.Capacitance (uF)	850	750
	Dimensions(mm)	240x166x32	247x158x29
	Volume(L)	1.27	1.13

Honda는 캐패시터에 사용된 필름을 1세대 비해 더 얇은 소재로 사용하고 캐패시턴스의 용량을 감소시켰다. 이를 통하여 27%의 크기 감소와 23%의 무게 감소를 이룰 수 있었다[6].

GM도 Volt-2 모델에서 bulk 캐패시터 (smoothing 캐패시터)를 표 6과 같이 개선하였다. 먼저 이전모델인 Volt-1에서 사용하던 2.8um에 필름에서 더 얇은 2.5um에 필름을 사용 하였으며 이에 따라 크기를 줄일 수 있었다[5].

3.7 Boost Converter를 이용한 DC링크 전압의 증가

EV용 모터는 높은 역기전력 상수를 가지기 때문에, 고속영역에서 약 계자 제어를 위한 큰 D상전류가 필요하다. 특히 저 토크 고속 운전시 큰 D 상 전류에 의한 동손으로 말미암아 낮은 효율 특성을 보이게 된다.

이러한 문제는 DC 링크 전압을 올림으로써 해결할 수 있다.고전압 배터리를 사용하면 직렬로 연결하는 cell의 수가 증가하기 때문에, cell balancing 에 따른 효율 감소 및 사용 용량 제한이라는 불이익을 받게 된다. 따라서 Toyota 와 Honda 에서는 그림 8에 나타나 있는 것과 같은 양 방향 boost converter를 사용한다. 여기서 특기할 것은 boost converter의 인덕터 코어 손실과 스위치 손실이 boosting 전압 비에 따라 증가 한다는 점이다.

표 7은 201.6V 배터리를 장착한 2010 Prius모델에서 40Nm 부하토크를 기준으로 boost converter를 이용했을 때의 모터 및 인버터의 효율을 보여준다.

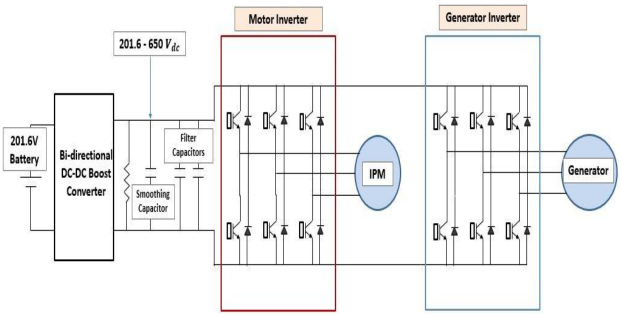

Fig. 8. Circuit diagram of 2010 Prius PCU[10].

TABLE Ⅶ
EFFICIENCY OF TOYOTA 2010 PRIUS MOTOR AND INVERTER[10].

DC-link Volt (V) / Speed (rpm)	225	500	650	T_L [Nm]
2000	93%	90%	90%	40
4000	-	94%	92%	40
6000	-	93%	95%	40

속도가 증가함에 따라 DC 링크전압을 증가시킬 때 효율이 상승됨을 보여 준다. 보다 구체적으로, 비록 boost converter의 손실이 있을지라도 모터 및 인버터의 효율 상승으로 말미암아 전체 효율이 증가함을 보여 준다[10].

4. 결 론

Toyota, Honda, GM의 차세대 하이브리드 차량모델을 비교 분석함으로써 하이브리드 차량용 모터 및 인버터의 동향에 대해서 살펴보았다. 모터의 경우 효율을 증대시키는 동시에 소형화 및 경량화를 통한 토크밀도와 전력밀도를 높이는 추세이다. 3사 모두 헤어핀 권선을 사용하여 점적률을 높이고, 고속화함으로써 전력밀도를 높일 수 있었다.

인버터의 경우 반도체 소자의 구조를 변화시켜 정상상태 손실을 줄이고 효율을 높였다. 또한 이중냉각 방식과 캐패시터 필름의 개선으로 모듈을 소형화 및 경량화 하였으며 이를 통해 전력밀도를 높일 수 있었다. 특히 Toyota와 Honda의 경우 양방향 DC-DC boost converter를 이용하여 DC 링크 전압을 증가시킴으로써 고효율 운전방식을 추구하고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 하이브리드 차량에서 모터 및 인버터의 경량화 및 소형화를 통한 전력밀도와 효율을 증대시키는 연구가 계속적으로 진행되고 있다. 이러한 노력을 통해 하이브리드 차량이 소형차에 국한되지 않고 중형차 이상으로 확장될 것이며 하이브리드 시장은 더욱 확장 될 것으로 예상된다.

References

[1] F. Momen, K. M. Rahman, Y. C. Son, and P. Savagian, "Electric motor design of general motors' chevrolet bolt electric vehicle," SAE 2016-01-1228.

[2] M. Inoue, H. Takamatsu, M. Ogami, K. Ninomiya, K. Ito, and T. Shibata, "New-structure motor for full hybrid electric vehicle," SAE 2016-01-1225.

[3] M. Taniguchi, T. Yashiro, K. Takizawa, S. Baba, M. Tsuchida, T. Mizutani, H. Endo, and H. Kimura, "Development of new hybrid transaxle for compact-class vehicles," SAE 2016-01-1163.

[4] B. Conlon, T. Blohm, M. Harpster, A. Holmes, et al., "The next generation "Voltec" extended range EV propulsion system," SAE 2015-01-1152.

[5] M. Anwar, T. Achatz, A. Tata, et al., "Power dense and robust traction power inverter for the second-generation chevrolet volt extended - range EV," SAE 2015-01-1201.

[6] Y. Kashimura and Y. Negoro, "Transmission-mounted power control unit with high power density for two-motor hybrid system," SAE 2016-01-1223.

[7] O. Kitazawa, T. Kikuchi, M. Nakashima, Y. Tomita, and H. Kosugi, "Development of power control unit for compact-class vehicle," SAE 2016-01-1227.

[8] K. M. Rahman, S. Jurkovic, C. Stancu, J. Morgante, and P. J. Savagian, "Design and performance of electrical propulsion syste of extended range electric vehicle (EREV) chevrolet volt," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51, No. 3, May/Jun. 2015.

[9] S. Jurkovic, K. Rahman, B. H. Bae, N. Patel, P. Savagian, "Next generation chevy volt electric machines; design, optimization and control for performance and rare-earth mitigation," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE)*, Sep. 2015.

[10] M. Olszewski, "Evaluation of the 2010 toyota priushybrid synergy drive system," U.S. Department of EnergyVehicle Technologies, EE-2G1000 Independence Avenue, S.W.Washington, D.C. 20585-0121.

[11] Remy Technologies, L.L.C(2011. 10. 27) Conductor weld-end length control forming, U.S.A, US20130106231

[12] Remy Technologies, LL.C(2014. 1. 24) Hairpin joint, U.S.A, US 20150214820 A1.

[13] S. Jurkovic, "Induction machine design and analysis for general motors e-assist electrification technology," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 1, pp. 631 - 639, Jan./Feb. 2015.

김성진(金成辰)
1991년 9월 27일생. 2016년 숭실대 전기공학부 졸업. 2016년~현재 포항공과대학원 전자전기공학과 석사과정.

홍승민(洪承愍)
1990년 5월 8일생. 2015년 아주대 전자공학과 졸업. 2016년~현재 포항공과대학원 전자전기공학과 석사과정.

남광희(南光熙)
1956년 9월 26일생. 1980년 서울대 화학공학과 졸업. 1982년 서울대 제어 및 계측공학과, 수학과 졸업(석사). 1986년 the University of Texas at Austin 전기공학과 졸업(공박). 1998~2000년 포항공과대 정보통신연구소 소장. 1998~현재 포항공과대 전자전기공학과 교수. 2016년~현재 당 학회 학회장.