

무선충전시스템의 충전 제어 방식

신한호¹, 허 준¹, 전성준[†]

Charging Control of Wireless Charging System

Han-Ho Shin¹, Joon Heo¹, and Seong-Jeub Jeon[†]

Abstract

A hybrid control of a rectifier/regulator of wireless power transfer systems for electric vehicles is studied. A combined rectifier/regulator is used for charging control. The hybrid control comprises integral cycle control and pulse width modulation control to cope with the variations in the induced voltage due to clearance and alignment. The hybrid control has good control capability and does not cause severe switching loss. A 22 kW prototype of the Wireless Power Transfer class 4 charging system defined by the Society of Automotive Engineers is constructed and tested to verify the proposal.

Key words: Combined rectifier/regulator, Electric vehicle, Hybrid control, Wireless charging, WPT 4

1. 서 론

무선 전력 전송은 저전력 출력에서부터 고전력 출력을 요하는 시스템에 광범위하게 사용되고 있다^{[1]-[5]}. 특히 Tesla 사의 전기자동차 개발의 성공을 계기로 많은 자동차 제작사들은 전기자동차에 대한 연구를 집중적으로 하여 양산을 구체화 하고 있다. 전기 자동차의 보편화에 따라 유선 충전 방식인 plug-in 충전 방식은 많은 문제점과 불편함을 야기하여 사용적합성이 떨어진다. 따라서 전기 자동차의 무선 충전 방식의 도입은 필연적이다^[6]. 주차장 등에서 정차된 차량을 자동으로 충전이 가능케 하는 무선전력전송 시스템의 도입을 통하여, 더 나아가 운행 중인 도로에서도 충전이 이루어지는 dynamic 충전도 가능할 수 있다^{[6],[7]}.

SAE(Society of Automobile Engineers)는 자동차 무선전력전송 시스템의 최대 입력 전력에 따른 WPT(Wireless Power Transfer) 등급의 표준(J2954)을 제정중이고, WPT class 3까지는 표준 제정이 완료되었다. SAE에서는 전기 자동차용 무선 전력전송 시스템의 동작

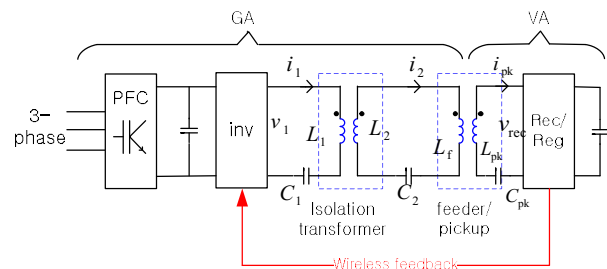


Fig. 1. Wireless charging system for an electric vehicle.

주파수를 85[kHz]로 선정하였다. 이 동작 주파수에서 스위칭 소자에서 하드 스위칭을 하게 되는 경우 많은 스위칭 손실을 발생한다. 따라서 스위칭 손실이 적은 SiC(Silicon Carbide) FET(Field Effect Transistor)나 GaN(Gallium Nitride) FET를 쓰는 것이 바람직하다^[8]. 본 연구에서는 입력 전력이 22[kVA]급인 SAE WPT class 4에 해당하는 코일과 SiC 소자를 사용하였다^[9].

2. WPT class 4 시스템

SAE는 전체 충전 시스템을 GA(Ground Assembly)와 VA(Vehicle Assembly)로 나누고 있으며, 본 논문에서 제작된 시스템은 그림 1과 같은 구조를 가지고 있다.

GA는 상용교류를 3상 교류 정류단(PFC 또는 3상 교류 정류기)을 통해 DC 전압으로 정류한다. 공진형 인버터를 이용하여 85[kHz]로 스위칭하여 Feeder Coil을 통해 무선으로 VA에 전력을 전송한다. VA는 Pickup Coil에

Paper number: TKPE-2019-24-4-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jeub@pknu.ac.kr, Dept. of Electronic Eng., Pukyong Nat'l University

Tel: +82-51-629-6216 Fax: +82-51-629-6210

¹ Dept. of Electronic Eng., Pukyong National University
Manuscript received Feb. 2, 2019; revised Feb. 20, 2019;
accepted Mar. 11, 2019

— 본 논문은 2018년 추계학술대회 우수추천논문임

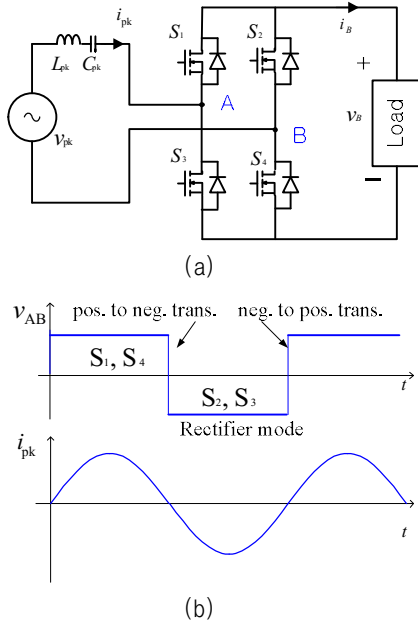


Fig. 2. Proposed combined rectifier/regulator: (a) circuit diagram, (b) Synchronous rectification control waveforms.

유기된 전력을 Rec/Reg를 통하여 직류로 변환해 배터리를 충전하게 된다. 자동차 배터리에 충전되는 전력의 정보를 무선으로 GA에 전달하여서, 수신된 정보에 따라 GA는 3상 교류 정류단의 출력 DC 전압과 공진형 인버터의 도통각을 제어하여 Feeder Coil에 흐르는 전류를 조절한다. 환경의 변화(이격거리, 오정렬 정도), 배터리의 SOC(State of Charge)에 따른 전압의 변화에 따른 충전 제어가 필요할 경우 VA는 Hybrid Control로 제어하게 한다.

3. 일체형 Rectifier/Regulator의 제어

그림 2는 제안된 일체형 Rec/Reg(Rectifier/Regulator)의^[10] 회로와 기본동작을 보여준다. VA는 풀 브릿지 회로, Pickup Coil과 배터리 사이의 공진 커패시터로만 구성되기 때문에 구조가 간단하고 장치의 경량화를 할 수 있어 비용을 절감할 수 있다. 일체형 Rec/Reg의 정류 방법으로 동기 정류 방법, Integral Cycle Control 및 PWM (Pulse Width Modulation) Control로 구성된 Hybrid Control 방식을 제안한다^{[11]-[14]}.

3.1 Synchronous Rectifier Control

동기 정류 방법이란 그림 2(a)에서 스위치(S1~S4)의 병렬로 붙은 다이오드가 켜지는 시점에서 FET를 켜는 방식에 해당한다. 일반적으로 다이오드의 전압 강하는 쇼트키 다이오드를 사용한다 할지라도 0.4[V] 이하로 낮추기가 쉽지 않다. SiC FET의 R_{dson} (on-상태 저항)은 수 [mΩ]의 것이 많아 수 십[A]의 전류에 의한 전압 강하를 0.4[V]이하로 쉽게 낮출 수 있다.^{[15],[16]} 이 경우

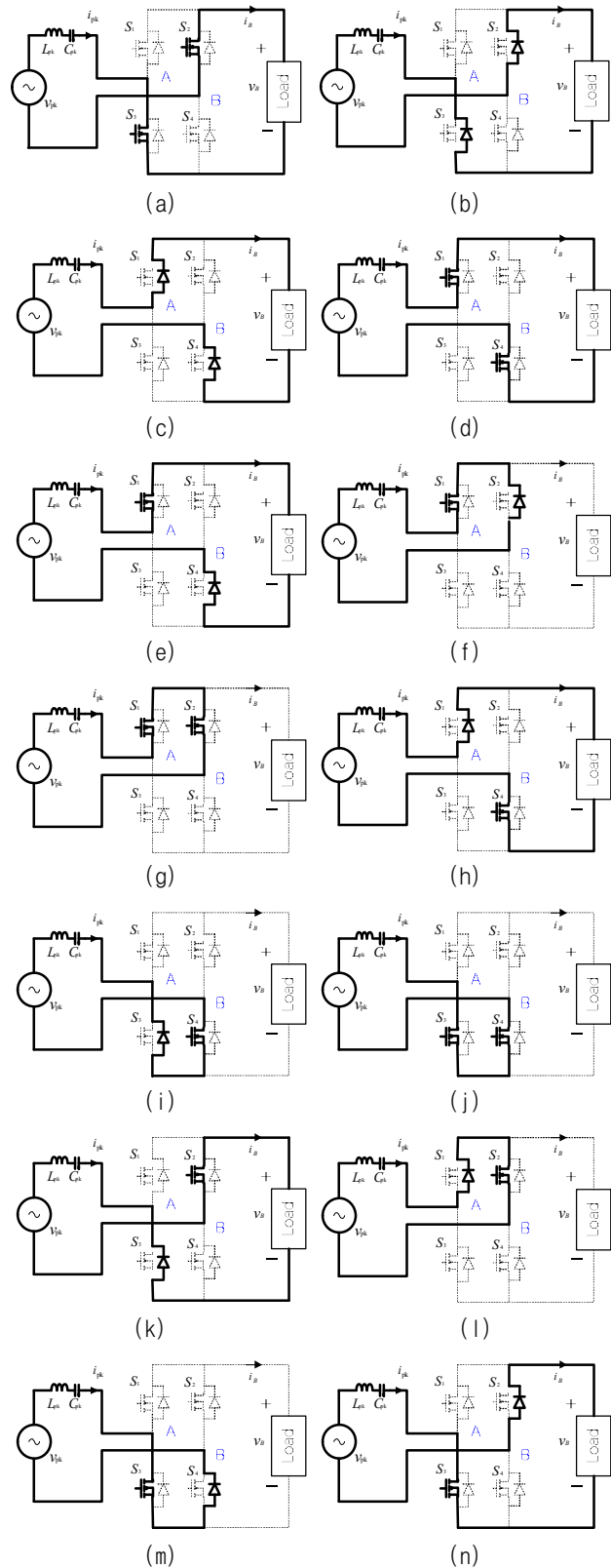


Fig. 3. Operation phases.

pickup의 실효전류 I_{pk} 에 의해 FET에서 발생하는 도통 손실은 다음 식 (1)과 같다.

$$P_{loss} = 2 \times I_{pk}^2 \times R_{dson} \quad (1)$$

TABLE I
STATE TRANSITION OF INTEGRAL CYCLE CONTROL

Synchronous Rectification → Short circuit		
Present condition	$i_{pk} > 0$	(d)-(e)-(f)-(g) or (d)-(h)-(i)-(j)
	$i_{pk} < 0$	(a)-(k)-(l)-(g) or (a)-(n)-(m)-(j)
Short circuit → Synchronous Rectification		
Present condition	$i_{pk} > 0$	(j)-(m)-(n)-(a) or (g)-(l)-(k)-(a)
	$i_{pk} < 0$	(j)-(i)-(h)-(d) or (g)-(f)-(e)-(d)

동기 정류 모드에서는 그림 2(b)와 같이 i_{pk} 가 양 일 때 S_1 과 S_4 스위치가 켜지고, i_{pk} 가 음 일 때 스위치 S_2 와 S_3 를 켜는 동작에 해당한다. 그림 3은 일체형 Rec/Reg의 여러 가지 동작 phase로 동기 정류 방식에서는 (a)~(d)가 사용된다. 그림 3에서 i_{pk} 가 음에서 양으로 전환되는 시퀀스는 (a)-(b)-(c)-(d)이고, 양에서 음으로 전환되는 시퀀스는 (d)-(c)-(b)-(a)에 해당한다.

(a)-(d), (d)-(a)로 변환되는 동작 사이에 (b)와 (c)의 다이오드로 전류가 흐르는 동작을 삽입하여 rec/reg에서 안전하게 soft switching을 할 수 있다.

동기 정류 방식의 단점은 환경의 변화(이격거리, 오정렬 정도), 배터리의 SOC에 따른 전압의 변화에 따른 충전 제어 능력은 없다. 따라서 급전 측 공진형 인버터의 출력 전압을 변경하거나 다른 제어 방법이 추가로 필요하다.

3.2 Integral Cycle Control

Integral cycle control이란 v_{AB} 가 0이 되게 S_1 과 S_2 를 동시에 켜거나 S_3 와 S_4 를 동시에 켜는 동작인 SC(Short-Circuit) 구간 T_{on} 과 동기 정류 구간 T_{off} 로 구성된다^[14]. T_{off} 와 T_{on} 은 동작 교류 1주기 T 의 정수배로 각기 nT 와 mT 라 할 때, 유기된 전압 V_{pk} 와 배터리 전압 V_B 의 관계는 다음 식 (2)와 같다.

$$V_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{n}{m+n} V_{pk} \quad (2)$$

동기 정류 구간과 SC 구간의 전환되는 시퀀스는 표 1과 같다.

Integral cycle control 동작은 스위칭 손실과 도통 손실 모두 최소화 하면서 전압을 제어할 수 있는 장점이 있다. 하지만 원활한 제어와 해상도를 높이기 위해서는 $N(=m+n)$ 이 커야 한다. N 이 커짐에 따라 포함되는 동작 교류 주기 수가 커지면 가청주파수 잡음이 발생할 수 있다.

3.3 PWM Control

그림 5와 같이 I_{+lim} 과 I_{-lim} 으로 i_{pk} 와 비교하여 PWM 파를 만들고 전류를 제어할 수 있다. v_{AB} 양단 전압을 영

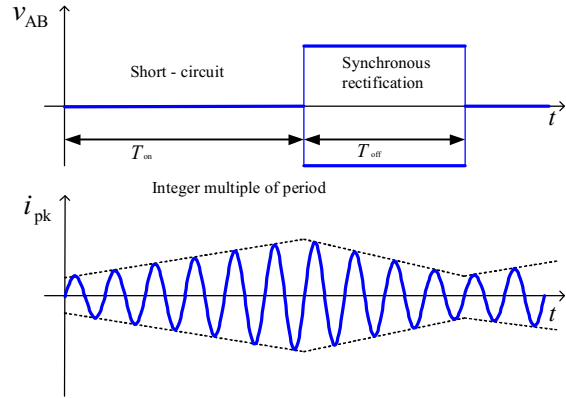


Fig. 4. Integral cycle control waveforms.

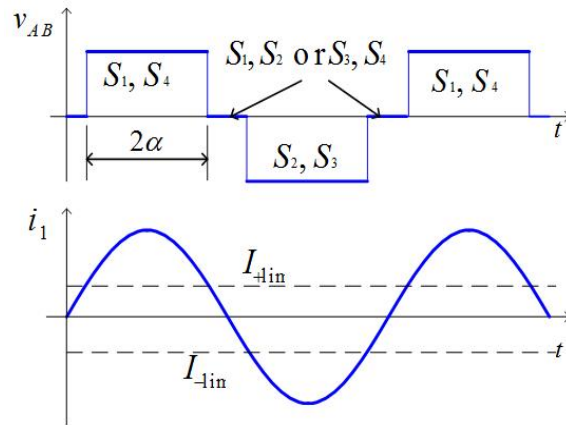


Fig. 5. PWM control waveforms.

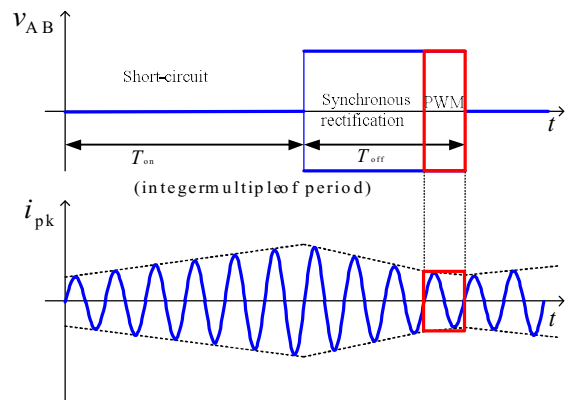


Fig. 6. Hybrid control waveforms.

으로 만들기 위해서는 i_{pk} 가 양(+)인 경우에는 S_2 나 S_3 를 켜고 i_{pk} 가 음(-)인 경우에는 S_1 나 S_4 를 켜면 된다.

동시에 켜는 경우에는 전류의 방향을 고려하지 않아도 된다. PWM control할 때 pickup의 유기 전압과 배터리 전압은 식 (3)과 같은 관계를 갖는다. 여기서 α 는 스위치의 도통각에 해당한다.

$$V_{pk} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_B \sin\alpha \quad (3)$$

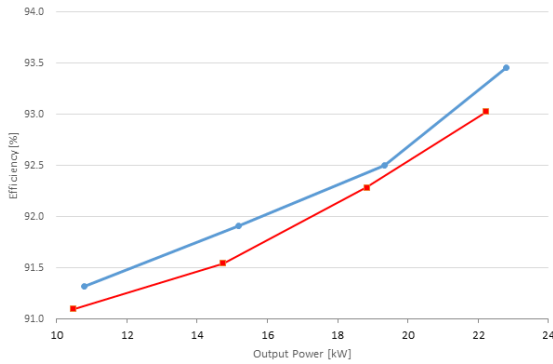


Fig. 7. Diode rectification and synchronous rectification.
Red: Efficiency of diode rectification.
Blue: Efficiency of synchronous rectification.

이 방식의 단점은 스위칭 소자에 하드 스위칭으로 동작하는 시점이 반드시 삽입 되어 스위칭 손실이 늘어나는 것이다.

3.4 Hybrid Control

Hybrid Control이란 Integral Cycle Control 동작과 PWM Control 구간으로 구성되어진 제어 방법에 해당한다. 그림 6의 Hybrid Control에서는 제어의 한 주기 중에서 동작 교류의 1주기에 해당되는 동안에 PWM 제어를 하는데, PWM 폭이 연속적으로 변하는 값이므로 제어가 연속적이다.

따라서 제어의 한 주기 중에 포함된 동작 교류 신호의 주기 수가 작아도 제어의 해상도를 높일 수 있다. Hybrid Control 정류 방식을 사용하게 되면 pickup의 유기 전압과 배터리 전압은 식 (4)와 같은 관계를 갖는다.

$$V_{pk} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{N} (n-1 + \sin\alpha) V_B \quad (4)$$

α 는 PWM Control시 FET가 Turn on 되는 스위치의 도통각에 해당하여, pickup coil에서 원하는 전압을 자유롭게 제어가 가능하다.

4. 실험

본 연구에서 스위칭 소자로는 CREE사의 SiC FET CAS300M12BM2소자를 사용하였다.

4.1 Synchronous Rectification Control Mode

동기 정류 방식과 SiC FET의 바디 다이오드만을 이용하여 정류하는 다이오드 정류 방식에서 인버터 도통각에 따른 출력 전력에 대한 효율을 비교하였다. 출력 전력에 대한 시스템 효율을 비교한 결과는 그림 7과 같다.

배터리 충전 전압의 변화가 DC 250[V]~420[V]인데 [17], 22[kW] 출력이 330[V] 내외에서 얻어지도록 5.0[Ω]의 ±0.5[Ω] 범위에서 연구를 진행하였다.

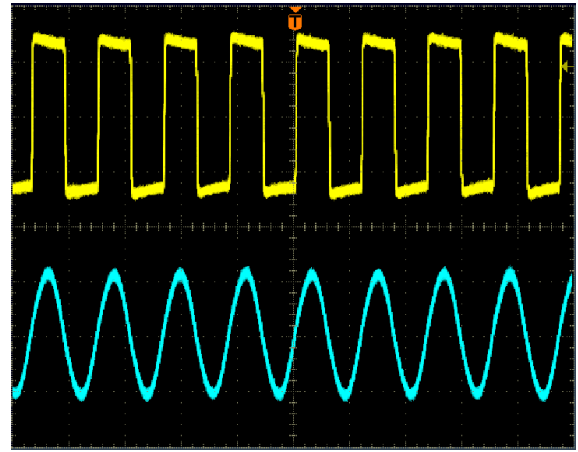


Fig. 8. Synchronous rectification waveforms(distance between coils : 150[mm]).
Top(yellow): rec/reg voltage(v_{AB}), 250 V/div.
Bottom(blue): rec/reg current(i_{pk}), 100 A/div.
Time base: 10μs/div.

TABLE II
COMPOSITION OF HYBRID CONTROL MODE

Mode	Composition
Mode 0	Synchronous Rec(8 cycles)
Mode 1	Synchronous Rec(7 cycles) + PWM(1 cycle)
Mode 2	Synchronous Rec(6 cycles) + Short-Circuit(1 cycle) + PWM(1 cycle)
Mode 3	Synchronous Rec(5 cycles) + Short-Circuit(2 cycles) + PWM(1 cycle)

그림 8은 동기 정류 방식으로 동작하는 예로 직류 출력 전압은 328.7[V], 전류 67.7[A]이고 효율은 93.5[%] 정도다.

4.2 Hybrid Control Mode

Hybrid Control은 표 2와 같이 여러 가지 mode 동작으로 구성되어있다. 유도된 전압에 비해서 부하 전압이 높아질수록 SC 구간이 늘어나게 하였다.

급전 전류가 부족하고 Mode 0으로 동작하여 DC 전압이 305.5[V]인 상태에서 Hybrid Control Mode 2로 동작시켜 327.5[V]의 직류 전압을 얻었다. 그 동작 파형이 그림 9과 같다. 이때 전류는 67.6[A]였다. Mode 2 동작 방식에서 입력되는 3상 전원의 전력은 24.2[kW]로 측정되었으며, 전체 시스템 효율은 91.48[%]이다.

Mode 2에서 효율이 약 2[%] 하락한 이유는 급전 전류가 충분한 경우에 비해 유기전압이 낮아져 인버터 전류와 pickup 전류가 증가하고 스위칭 손실이 증가하였기 때문이다. pickup에 흐르는 전류가 76[A]에서 100[A]로 증가하여 스위칭 소자에서의 도통 손실이 45[W] 정도 증가하였고 또한 스위칭 소자가 100[A]에서 주기 당

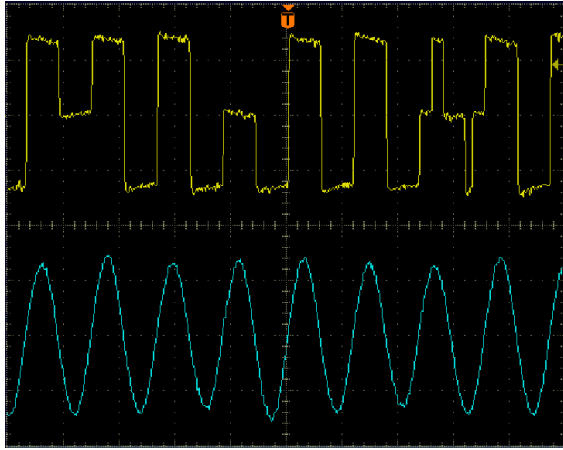


Fig. 9. Hybrid control mode 2 waveforms(distance between coils : 150[mm]).
 Top(yellow): rec/reg voltage(v_{AB}), 250 V/div.
 Bottom(blue): rec/reg current(i_{pk}), 100 A/div.
 Time base: 10 μ s/div.

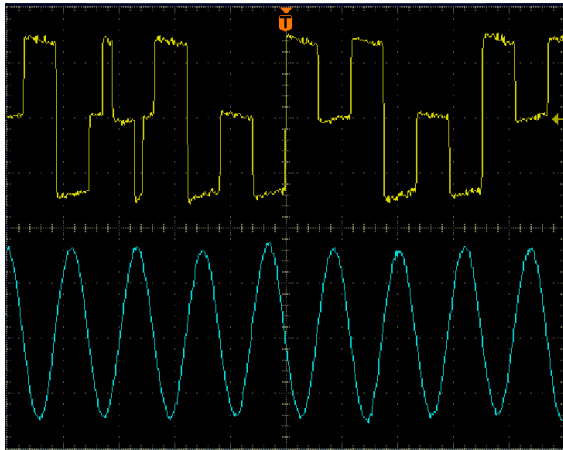


Fig. 10. Hybrid control mode 3 waveforms(distance between coils : 150[mm]).
 Top(yellow): rec/reg voltage(v_{AB}), 250 V/div.
 Bottom(blue): rec/reg current(i_{pk}), 100 A/div.
 Time base: 10 μ s/div.

4회 스위칭하여 스위칭 손실이 170[W]정도 발생하였다. 인버터 측에서도 도통손실이 20[W], 스위칭 손실이 112[W] 증가하였으며, 절연 변압기, pickup에서 각각 45[W]정도의 손실이 증가된 것으로 추정된다.

Hybrid Control Mode 3에서 부하로 출력되는 DC 전압은 344.7[V], 전류 64.3[A]가 측정되었다. Mode 3 동작 방식에서 입력되는 3상 전원의 전력은 24.4[kW]로 측정되었으며, 전체 시스템 효율은 90.84[%]이다.

Hybrid Control Mode 3 동작에서 부하로 출력되는 전압 전류 파형은 다음 그림 10과 같다. 이 동작에서는 부하 전압이 높아졌는데 22[kW] 정격 출력을 유지하기 위하여 부하 저항을 0.5[Ω] 증가시켰다.

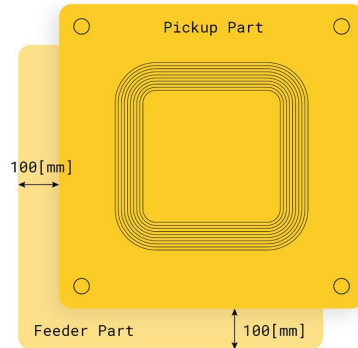


Fig. 11. Misalignment coils(horizontal and vertical : 100[mm]).

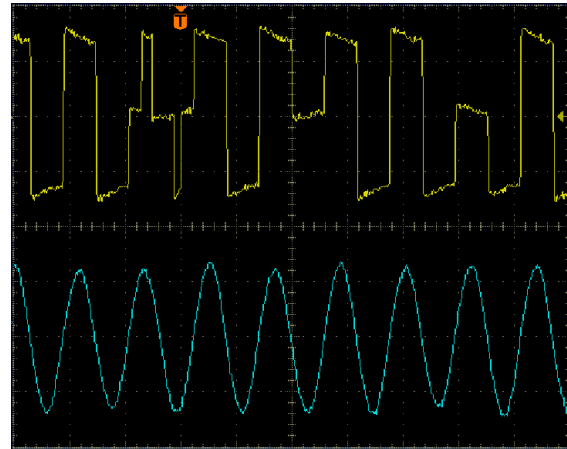


Fig. 12. Hybrid control mode 2 waveforms(horizontal and vertical misalignment : 100[mm]).
 Top(yellow): rec/reg voltage(v_{AB}), 250 V/div.
 Bottom(blue): rec/reg current(i_{pk}), 100 A/div.
 Time base: 10 μ s/div.

4.3 코일 오정렬시의 Hybrid Control 동작

그림 11과 같이 급전 코일과 집전 코일이 가로 100[mm], 세로 100[mm] 오정렬 되어있는 상황에서 Hybrid Control을 통하여서 22[kW] 출력을 얻는데 효과적인 것을 확인하였다.

급전 코일과 집전 코일이 중앙 정렬에서 가로, 세로로 오정렬이 되면 코일 간 상호인덕턴스가 감소하여 집전 코일로 유기되는 전압의 크기가 감소하게 된다. 이 때에 그림 12와 같이 Hybrid Control Mode 2로 제어함으로써 코일 간에 오정렬이 발생하더라도 편리하게 22[kW]를 얻을 수 있다.

4.4 이격 거리 200[mm]의 Hybrid Control 동작

급전 코일과 집전 코일 이격거리를 200[mm]의 높이로 수정하여, 이격거리에 따른 Hybrid Control의 유용성을 확인하였다.

공진형 인버터 도통각을 최대 제한 값인 170°로 증가시키고 Rec/Reg에서 동기 정류 동작을 시킬 경우, 부하

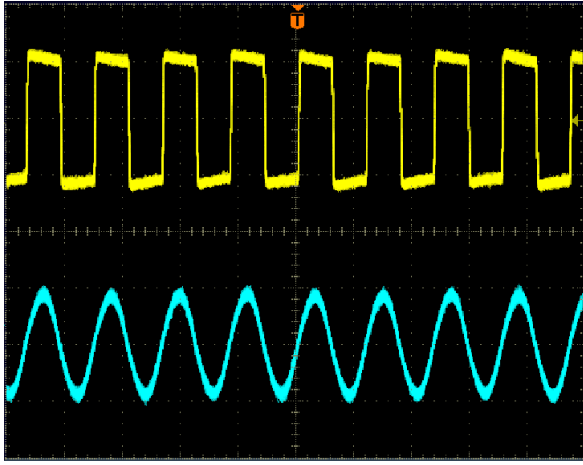


Fig. 13. Synchronous rectification waveforms(distance between coils : 200[mm]).

Top(yellow): rec/reg voltage(v_{AB}), 250 V/div.

Bottom(blue): rec/reg current(i_{pk}), 100 A/div.

Time base: 10 μ s/div.

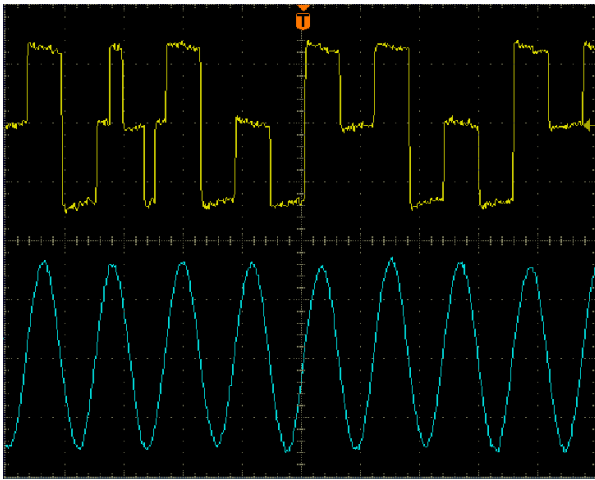


Fig. 14. Hybrid control mode 3 waveforms(distance between coils : 200[mm]).

Top(yellow): rec/reg voltage(v_{AB}), 250 V/div.

Bottom(blue): rec/reg current(i_{pk}), 100 A/div.

Time base: 10 μ s/div.

전압, 전류 파형은 그림 13과 같다. 부하 전압은 266.4[V]로 인버터를 통하여 전압을 더 이상 높일 수 없다. 전류 54.9[A]가 측정되었고, 입력되는 3상 전원의 전력은 15.6[kW]로 측정되었다.

이 때 Hybrid Control Mode 3으로 동작시켰다. 출력 전압은 328.0[V], 전류 67.6[A]를 얻을 수 있었고, 공진형 인버터의 도통각은 125°로 감소하였다. 부하 전압, 전류 파형은 다음 그림 14와 같다. Mode 3 동작을 통하여 출력 전력을 22.173[kW]를 얻을 수 있었다. 입력되는 3상 전원의 전력은 24.5[kW]로 측정되었으며, 전체 시스템 효율은 90.50[%]이다.

5. 결 론

본 논문에서는 SAE의 WPT 4급인 22[kW] 무선 충전 시스템의 충전 제어 방식으로 Hybrid control 방식을 제안하였다.

Hybrid Control 방식에서는 보통의 상태에서는 Rec/Reg가 동기 정류 방식으로 동작하고 GA의 inverter 출력을 통해 충전 제어를 한다. 급전·집전 코일의 이격 거리 증가, 과도한 오정렬로 인하여 유기 전압이 낮고 배터리의 전압이 상승하여 인버터만으로 충전이 어려울 때 Hybrid Control 방법을 사용하여 효과적으로 충전 제어가 가능하다.

Hybrid Control은 손실의 증가를 최소로 하면서 낮은 유기 전압으로도 전압이 높은 배터리를 충전할 수 있도록 한다. prototype의 다양한 시험을 통하여 제안의 타당성을 확인하였다.

고효율의 무선 충전 시스템의 구축과 SAE의 J2954 제정에 도움이 되기를 기대한다.

본 연구는 2017년도 중소벤처기업부의 기술개발 사업 지원에 의한 연구임.

References

- [1] K. Hatanaka, F. Sato, et al., "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 38, No. 5, pp. 3329-3331, 2002.
- [2] J. Wang, S. L. Ho, W. N. Fu, and M. Sun, "Analytical design study a novel witrlicity charger with lateral and angular misalignments for efficient wireless energy transmission," *IEEE Trans. Magnetics.*, Vol. 47, No. 10, pp. 2616-2619, 2011.
- [3] D. N. Lim, D. S. Lee, and S. J. Jeon, "Output characteristics of pickup according to pickup's posture," in *Proc. of 8th Conference on National Defence Technology*, pp. 824-828, 2012.
- [4] C. S. Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 52, No. 5, pp. 1308-1314, 2005.
- [5] S. J. Jeon, "2-phase drive for electric vehicle charging," in *Proc. of KIEE Summer Conference 2015*, pp. 1-2, 2015.
- [6] J. Shin, et al., "Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway powered moving electric vehicle," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, Vol. 61, No. 2, pp. 1179-1192, 2014.
- [7] D. S. Lee, D. N. Lim, S. J. Jeon, and Y. S. Ko, "Electric yard tractor with furtive charging," in *Proc.*

- of *Power Electronics Annual Conference*, pp. 482-483, 2014.
- [8] J. Heo and S. J. Jeon, "Charging control of wireless charging system," in *Proc. of 48th KIEE Summer Conference*, pp. 6-7, 2017.
- [9] J. Heo, H. H. Shin, S. J. Jeon, W. S. Jung, and J. H. Kim, "Characteristics of WPT 4 coil of wireless charging system for electric vehicle," in *Proc. of 50th KIEE Summer Conference*, pp. 23-24, 2018.
- [10] D. H. Cho, S. J. Jeon, et al., "Method and apparatus for controlling rectification and regulation," Korea Patent 10-1383556-0000, 2014.
- [11] M. M. Jovanovic, M. T. Zhang, and F. C. Lee, "Evaluation of synchronous-rectification efficiency improvement limits in forward converter," *IEEE trans. Ind. Elec.*, Vol. 42, No. 4, pp. 387-395, 1995.
- [12] G. B. Joungh, C. T. Rim, and G. H. Cho, "Integral cycle mode control of the series resonant converter," *IEEE Tran. Power Elect.*, Vol. 4, pp. 83-91, 1989.
- [13] M. Afshin and A. K. Rathore, "Receiver side control for efficient inductive power transfer for vehicle recharging," in *Proc IEEE Transportation Electrification Conference*, pp. 1-6, 2017.
- [14] J. Heo, H. H. Shin, S. J. Jeon, and M. T. Huh, "Efficiency comparison of rec/reg of wireless charging system for electric vehicle according to charging control methods," *KIEE Summer Conference*, pp. 1-2, 2018.

- [15] Wolfspeed, "CAS300M12BM2," CREE, pp. 1-9, 2017.
- [16] Semikron, "SKM350MB120SCH17," SEMIKRON, pp. 1-7, 2018.
- [17] K. Tachikawa, M. Kesler, and O. Atasoy, "Feasibility study of bi-directional wireless charging for vehicle-to-grid," SAE Technical Paper, pp. 1-9, 2018.



신한호(申韓浩)

1992년 9월 8일생. 2018년 부경대 전자공학과 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.



허준(許俊)

1967년 3월 1일생. 2001년 부경대 전자공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 2008년~2014년 (주)에테크놀로지 대표.



전성준(田成緝)

1957년 8월 28일생. 1980년 숭전대 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 1982년~1985년 한국과학기술원 연구원. 1985년~1986년 한국전기연구소 연구원. 1986년~현재 부경대 교수.