

넓은 범위의 XY편차에서 높은 호환성을 만족하는 재구성 가능한 무선충전 패드의 구조 및 제어 방법

이병주¹⁾²⁾, 이영달³⁾, 이교일²⁾, 박기범^{*1)}
한국과학기술원¹⁾ 주식회사 와이파워원²⁾ 전남대학교³⁾

A reconfigurable wireless charging pad for high interoperability and wide range of XY alignment

Byung-Ju Lee¹⁾²⁾, Young-Dal Lee³⁾, Kyoil Lee²⁾, and Ki-Bum Park^{*1)}
¹⁾ KAIST ²⁾ Wipowerone ³⁾ Chonnam national university

ABSTRACT

본 논문은 다양한 형태의 코일구조를 갖는 전기자동차용 무선충전 시스템에서 넓은 범위의 XY 편차 조건에서 높은 호환성을 만족하는 무선충전 송신패드의 구조와 제어 방법을 기술한다. 전기차 무선충전 시스템에서 송신패드(Tx Pad)와 수신패드(Rx Pad)의 기존 코일 구조는 Circular Pad(CP)와 Double-D Pad(DDP)의 구조가 널리 활용되고 있다. 이러한 기존의 코일을 이용한 동종코일간 결합 및 이종코일간 대한 결합에 대하여 SAE J2954등에서 규정하고 있으나, 제한적인 범위에서만 충전이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 CP, DDP 타입의 패드에 대해 넓은 XY 범위에서 높은 결합력을 유지하는 송신패드 및 제어방법을 제안하고자 한다. 제안하는 송신패드의 구조는 다상의 코일과 다상의 인버터를 활용하고 위상제어를 통해, 차량에 장착된 CP, DDP에 대응하여 표준편차를 벗어나는 넓은 XY범위에서 높은 결합계수를 확보할 수 있다.

1. 서론

전기자동차의 보급이 가속화되면서 충전 인프라의 발전은 필수적 요소로 대두되고 있다. 현재 전기자동차 충전기는 유선충전방식이 주류를 이루고 있으며, 그 기술적 안정성과 경제성으로 인해 시장을 지배 중이다. 하지만, 유선충전기는 충전과정에서 불편함과 잠재적인 안전문제를 동반하며, 이는 사용자 경험을 저해하는 요소가 된다. 이러한 문제를 해결하고자 세계각국은 다양한 충전방법을 모색하고 있다^{[1]-[2]}. 그 중 무선충전에 대한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 실증사업도 진행되어 상용화에 근접해 있다^[3].

무선충전 표준인 SAE J2954에 따르면 전기차 무선충전 시스템은 그림 1과 같이 크게 인프라인 Ground Assembly(GA)와 차량 측인 Vehicle Assembly(VA)로 나뉜다. GA는 전력변환부와 송신패드로 구성되며, VA는 수신패드와 정류기 및 정전압기로 구성된다^[4]. 무선충전 시스템에서 송신패드와 집전패드는 전자기 유도를 통한 비접촉 전력전달 방식의 핵심 요소로 기능한다. 이러한 송수신 패드의 설계에 있어, 그림 2에서 제시된 바와 같이 일반적으로 사용되는 코일구조는 Circular Pad(CP)와 Double-D Pad(DDP)이다^[4].

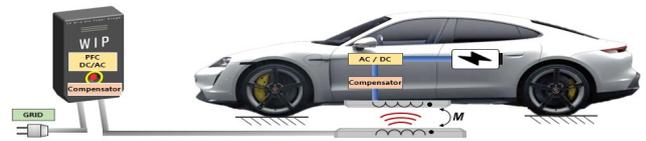


그림 1 전기차 무선충전 시스템의 구성

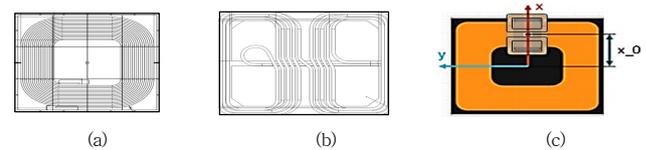


그림 2 SAE J2954에 명시된 기존의 송신패드와 수신패드에 활용되는 코일 구조와 이종코일간 상호운용 예 (a) Circular Pad (b) Double-D Pad (c) Natural X-Offset를 이용한 Circular Pad와 Double-D Pad 간 상호운용

표 1 SAE J2954에 규정된 XY 허용 편차

Offset Direction	Value (mm) Interop Class I GA	Value (mm) Interop Class II GA
ΔX	± 75 mm	± 75 mm
ΔY	± 100 mm	± 100 mm

기존의 코일 구조에서, CP(Tx)/CP(Rx)와 DDP(Tx)/DDP(Rx)와 같이 송신패드와 수신패드가 동일한 코일을 사용하는 경우, 표준편차 범위에서는 높은 결합 계수를 확보할 수 있어 전력 전송 효율을 높일 수 있지만, 실제 모든 운전자가 이를 지키기는 쉽지 않으며, 이러한 과 편차 영역에서는 결합력이 급격히 떨어질 수 있다. 또한, 무극성인 CP와 극성인 DDP의 상호운용을 할 경우, 즉 CP(Tx)/DDP(Rx) 또는 DDP(Tx)/CP(Rx)의 경우에는 자속의 상쇄로 결합력이 현저히 감소하며, SAE J2954는 이러한 경우에도 충전이 가능하도록 다른 모양의 패드 타입에서 공급하는(또는 공급받는) 자속이 상쇄되지 않도록 X축 Natural Offset을 주어 표준편차 범위 내에서 충전이 가능하도록 규정하고 있다. 하지만 코일구조상 X축 offset을 통해 증가한 결합계수는 X축의 편차에 따라 급격히 감소하여 넓은 범위에서의 상호운용성은 현저히 떨어지는 문제가 발생된다^{[5]-[6]}. 따라서, 동종코일 또는 이종 코일간에 넓은 XY편

차 조건에서도 높은 결합력을 갖는 송신 패드를 제안하고자 한다. 이는 다상의 코일을 구비하고, 2상의 인버터를 통해 구동한다. 또한, 다상 코일에 도통하는 전류의 간단한 위상 제어 방법을 통해, CP(Rx) 혹은 DDP(Rx) 타입에 대응하여 표준편차범위를 넘어서는 넓은 XY영역에서 높은 결합계수를 확보할 수 있다.

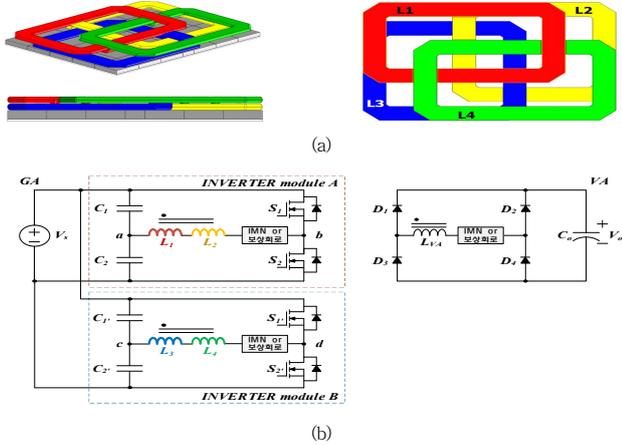


그림 3 재구성 가능한 송신패드 구조와 회로 (a) 재구성 가능한 코일구조 (b) 제안하는 송신패드의 모드변경을 위한 회로 구조

2. 재구성 가능한 패드의 구조와 구동 방법

제안하는 패드의 개념과 특징에 대해 설명한다. 재구성 가능한 패드의 구성은 그림 3과 같이 4개의 코일인 L1~L4와 코일과 이를 구동하는 2개의 인버터로 구성된다. 여기에서 인버터는 VA측 배터리 전압, 허용편차 범위 등의 조건에 따라 하프브릿지(Half-bridge) 또는 풀브릿지(Full-bridge) 인버터로 구성될 수 있다. 코일 L1과 L2는 직렬 연결되어 인버터 A와 연결되어 모듈 A를 구성하며, 코일 L3과 L4는 직렬 연결되어 인버터 B와 연결되어 모듈B를 구성한다.

제안하는 패드는 각 모듈의 인버터 구동방법에 따라 Circular 모드(C모드)와 Double-D 모드(DD모드)로 재구성되어 구동되어진다. 그림 4(c)와 같이 인버터A와 인버터B의 출력전류를 동상으로 제어하면 그림4(b)와 같이 코일 L1~L4에 흐르는 유효전류는 원형을 나타내고 CP에서 발생하는 형태와 유사한 자속이 생성된다. 이는 C모드로 CP와 조합하여 동작 시 결합력을 높인다. 비슷하게, 그림 4(f)와 같이 인버터A와 인버터B의 출력전류를 역상으로 제어하면 그림4(e)와 같이 코일 L1, L2와 L3, L4에 흐르는 유효전류는 Double-D 형태를 나타내고 DDP에서 발생하는 형태와 유사한 자속이 생성된다. 이는 DD모드로 DD패드와 조합하여 동작 시 결합력을 높일 수 있다.

CP(Rx)와의 결합 시 C모드, DDP(Rx)와의 결합 시 DD모드로 운영하는 경우 일정 XY편차범위 내에서는 높은 결합력을 유지할 수 있다. 하지만, 일정수준 이상의 XY편차범위를 넘어가는 과 편차 상태의 경우 보통의 CP(Tx) 또는 DDP(Tx)와 마찬가지로 결합력이 현저히 약해지게 된다. 이를 극복하기 위해 그림 5(b)와 같이 CP(Rx)와 결합 시 과 편차상태에서 DD모드로 동작, 그림 5(d)와 같이 DDP(Rx)와 결합 시 과 편차상태에서 C모드로 동작하여 유효한 공급자속 및 복귀자속을 증가시켜 결합계수를 높일 수 있다.

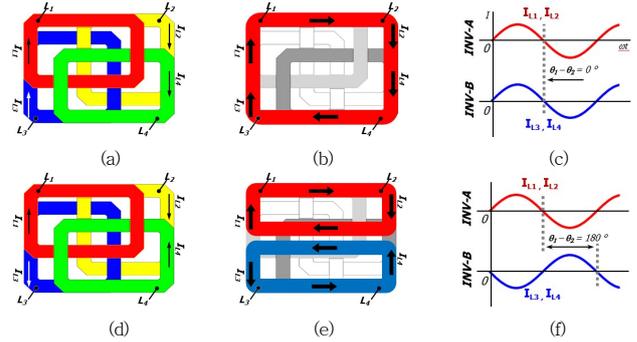


그림 4 제안하는 송신패드와 CP(Rx) 또는 DDP(Rx)의 호환을 위한 제어방법 (a) CP(Rx)의 호환을 위한 전류방향 (b) CP(Rx)호환 제어에 의한 유효 전류 방향 (c) CP(Rx)의 호환을 위한 인버터 전류 위상 (d) DDP(Rx)의 호환을 위한 전류방향 (e) DDP(Rx)호환 제어에 의한 유효 전류방향 (f) DDP(Rx)의 호환을 위한 인버터 전류 위상

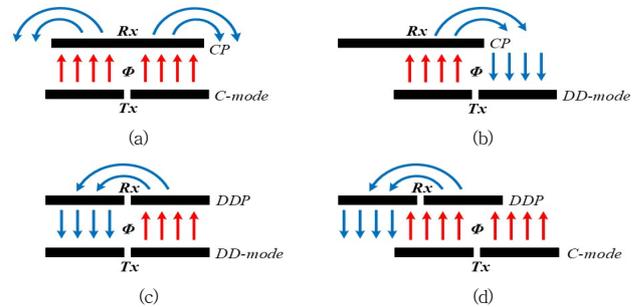


그림 5 제안하는 송신패드의 과편차 조건에서 결합력을 높이기 위한 제어 방법의 개념 (a) CP(Rx)의 정상편차조건에서 결합력을 높이기 위한 자속방향 (b) CP(Rx)의 과 편차 조건에서 결합력을 높이기 위한 자속방향 (c) DDP(Rx)의 정상편차조건에서 결합력을 높이기 위한 자속방향 (d) DDP(Rx)의 과 편차 조건에서 결합력을 높이기 위한 자속방향

3. 시뮬레이션 검증

제안하는 패드의 검증은 Finite element method(FEM) 해석을 수행하였다. 그림 6을 통해 제안하는 패드가 C모드, DD모드로 동작이 가능함을 확인할 수 있다.

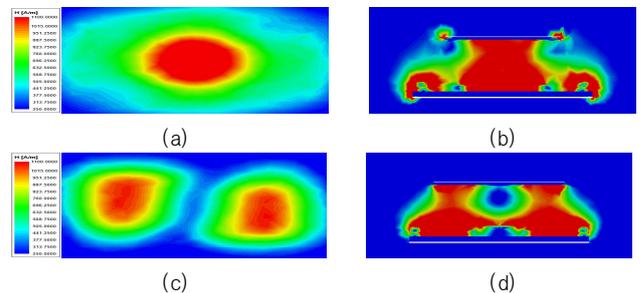


그림 6 제안하는 송신패드의 모드별 H-field (a) CP mode 동작 시 x-y평면 (b) CP mode 동작 시 x-z평면 (c) DDP mode 동작 시 x-y평면 (d) DDP mode 동작 시 x-z평면

구체적인 효율성 검증은 국제표준인 SAE J2954에 따라 표 2 및 표 3의 조건에 맞추어, 표 4와 같이 6개 조합에 대해 FEM 시뮬레이션을 수행하였다.

표 2 시뮬레이션 검증 조건

Parameters	Descriptions
Rated Power	WPT 3 (11kW)
Air Gap	170 (mm) (Tx coil(face) - Rx coil(face))
Alignment Conditions	정위치 : x(0mm), y(0mm) 최대편차: x(±75mm), y(±100mm) 과편차 : x(±225mm), y(±300mm)

표 3 송신패드 및 수신패드 코일 설계 파라미터

Parameters	Tx Coil			Rx Coil	
	Prop.	CP	DDP	CP	DDP
Self-Inductance [μ H]	59.53 (L_1+L_2) 59.78 (L_3+L_4)	34.84	69.61	41.33	74.04
W x L Dimension [mm]	590 x 630	650 x 500	590 x 630	380 x 380	388 x 429

표 4 시뮬레이션 검증을 위한 조합 구성

Case	Tx Coil	Rx Coil
1	Proposed Coil	CP (VA WPT 3)
2		DDP (VA WPT 3)
3	CP	CP (VA WPT 3)
4	(Universal GA)	DDP (VA WPT 3)
5	DDP	CP (VA WPT 3)
6	(GA WPT 3)	DDP (VA WPT 3)

그림 6은 시뮬레이션을 통해 확인한 제안하는 패드의 최대 출력을 위한 동작 모드맵이다. 그림 6(a)는 CP(Rx)와의 결합을 보여주며, 중심에서 특정 편차를 넘어가며 C모드에서 DD모드로 동작 변경하여 결합력을 높인다. 그림 6(b)는 DDP(Rx)와의 결합을 보여주며 특정 편차를 넘어가며 DD모드에서 C모드로 변경을 하며 결합력을 높인다.

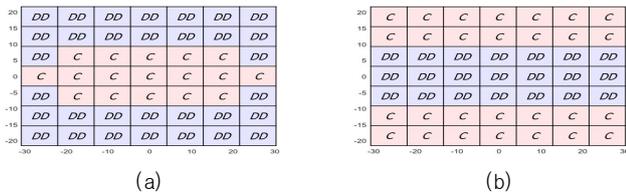


그림 6 제안하는 패드의 과편차 조건에서 효율적 충전이 가능한 모드맵 (a) 제안하는 송신패드와 C-패드와의 결합 시 최대 출력이 가능한 모드맵 (b) 제안하는 송신패드와 DD-패드와의 결합 시 최대 출력이 가능한 모드맵

표 5는 6개의 조합에 대하여 결합계수 k 및 충전가능영역에 대한 비교 결과를 나타낸다. 충전가능영역은 패드의 코일 및 코어의 손실, 인버터의 출력전류로 제한을 두어 선정하였다. 이를 통해 확인할 수 있듯이, 제안하는 패드는 동종코일간 결합과 비슷한 수준의 결합계수를 나타낸다. 그림 7은 6개의 조합에 대하여 결합계수에 대해 시각화 하여 나타낸 그래프이다. 제안하는 송신패드인 그림 7(a), (d)를 보면 넓은 범위에서 높은 결합력을 유지하는 것을 볼 수 있다. 반면에,

CP(Tx), DDP(Tx)는 중앙부에서만 높은 결합계수를 나타낸다. 그림 8은 충전가능영역을 시각화 하여 나타낸 그림이다. 그림 8(a), (d)를 통해 제안하는 송신패드의 넓은 범위의 충전가능영역을 확인할 수 있다.

표 5 시뮬레이션 검증 결과 (결합계수 및 충전가능영역 비교)

Case	정위치 [k] x(0mm), y(0mm)	최대편차 [k] x(±75mm), y(±100mm)	과편차 [k] x(±225mm), y(±300mm)	충전가능 영역
1	0.197	0.173 ~ 0.150	0.131 ~ 0.025	31
2	0.193	0.175 ~ 0.143	0.135 ~ 0.049	41
3	0.190	0.169 ~ 0.143	0.106 ~ 0.003	21
4	0.148	0.134 ~ 0.106	0.098 ~ 0.007	15
5	0.144	0.132 ~ 0.102	0.094 ~ 0.008	9
6	0.217	0.198 ~ 0.159	0.152 ~ 0.007	27

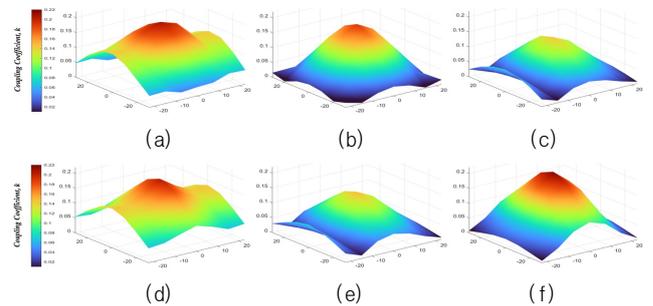


그림 7 다양한 편차조건에서 결합계수의 성능 비교 그림 (a) Case 1 (b) Case 3 (c) Case 5 (d) Case 2 (e) Case 4 (f) Case 6

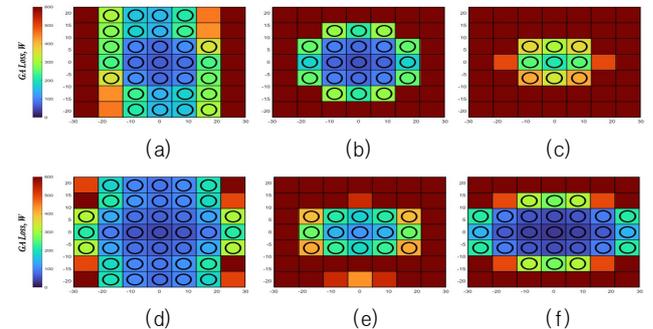


그림 8 다양한 편차조건에서 GA측 패드의 손실과 충전 가능 영역의 비교 그림 (a) Case 1 (b) Case 3 (c) Case 5 (d) Case 2 (e) Case 4 (f) Case 6

4. 결론

본 논문에서는 다양한 형태의 전기자동차용 무선충전 시스템에서 높은 호환성을 만족하며 넓은 범위의 XY편차에 대하여 높은 결합력을 갖는 새로운 무선충전 송신패드의 구조와 제어 방법을 제안하였다. 제안하는 패드는 간단한 제어를 통해 재구성 가능하며, 현재 널리 활용되는 CP(Rx), DDP(Rx)와의 높은 호환성 및 상대적으로 넓은 범위의 XY편차에서 충전이 가능함을 확인하였다. 향후 실험을 통해 제안하는 송신패드의 효율성을 검증하고자 한다.

Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국산업기술 진흥협회(KOITA)의 지원을 받아 수행된 연구임 (KOI TA-RND3-2-2022-03, 3상 다계층 무선충전 급집전 패드 시스템 개발)

참 고 문 헌

- [1] Electrek, Oct. (2020) "Tesla's robot snake charger is not dead yet," [Online] Available: <https://electrek.co/2020/10/09/tesla-robot-snake-charger-not-dead/>.
- [2] Early Adopter, Dec. (2020) "Volkswagen's cute mobile charging robot," [Online] Available: <https://www.earlyadopter.co.kr/145437>.
- [3] Motorgraph, Sep. (2022) "Green car, introduces GV60 wireless charging system," [Online] Available: <https://www.motorgraph.com/news/articleView.html?idxno=30714>.
- [4] SAE J2954. Task Force on Wireless Power Charging. April, 2020. [Online]. Available: <http://www.sae.org>.
- [5] Guang Yang, Kai Song, Ying Sun, Xiaohua Huang, Jin Li, Yu Guo, . . . Chunbo Zhu. (2021). Interoperability Improvement for Rectangular Pad and DD Pad of Wireless Electric Vehicle Charging System Based on Adaptive Position Adjustment. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 57, NO. 3.
- [5] Lammle, T.; Parspour, N.; Holz, J. Comparison of circular and double-d coil topologies for automotive inductive charging systems. In Proceedings of the 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Seoul, Republic of Korea, 15-19 November 2020.