

# 넓은 좌우정렬 허용편차를 갖는 WEV용 DQ 송신 코일 구조 연구

김의연, 정서영, 이은수  
한양대학교 ERICA 전자공학부

## DQ Tx Coil Structure for a Wide Misalignment Tolerance of WEV

Uiyeon Kim, Seoyeong Jung, and Eunsoo Lee  
Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

### ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차의 정렬편차 발생에도 전압게인의 급격한 감소를 방지할 수 있는 새로운 코일 형태를 제안하였다. 기존의 CR 구조는 좌우 정렬편차나 대각 정렬편차가 발생하면 출력전압이 급격하게 낮아지는 단점이 있어, 차량이 송신스테이션과 제대로 정렬되지 않을 경우 원하는 출력전력을 얻을 수 없었다. 본 논문에서는 기존 하나의 코일을 두 개로 나눈 DQ (Direct-Quadrature) 구조를 채택하였으며, DQ에 흐르는 전류의 위상을 90도로 설정함으로써 충전 공간상에 균등한 자기장 분포를 가능하게 하였다. 제안하는 DQ 코일구조를 통해 중앙점에서의 전압게인은 낮아지나, 좌우 정렬편차(대각 정렬편차) 발생에도 낮은 전압게인 감쇄를 가질 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 DQ 구조가 기존의 CR 구조 대비 넓은 좌우정렬 허용편차를 가질 수 있음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

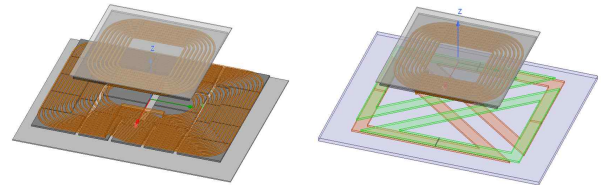
### 1. 서론

국제적 기후변화 대응을 위해 친환경 전기에너지 사용이 증가함에 따라 전기자동차(EV)가 상용화되고 있으며, 이에 따라 무선 전력 충전기술의 중요성이 더욱 증대되고 있다. EV용 무선충전기술은 SAE J2954, IEC 61980-1 규격을 중심으로 국제적인 표준화가 진행 중이며, 와이트리시티, Auckland, 쉘캠 등 다양한 기업에서 시장을 선점하기 위해 노력하는 추세이다. 특히, J2954 규격에서는 다양한 전력 상황에 대응하기 위해 최근 대응량 고속 충전을 지원하는 WPT4 (22kVA)급 코일 규격을 발표한 바 있다. 이와 같은 상황에서 무선전력 송수신부는 전송전력, 효율, EMI 등 무선전력의 성능에 주요하게 영향을 미치는 요소이므로, 제작 과정에 있어 해당 설계가 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 J2954에 제시된 일반적인 규격인 WPT3 (11kVA)/Z3급 규격을 중심으로 멀티피직스 해석을 진행하여 기존 구조의 장단점을 도출하고, 기존 WPT3/Z3의 단점인 좌우정렬편차를 근본적으로 개선할 수 있는 새로운 형상의 최적 코일구조 형상을 제안한다. [1]

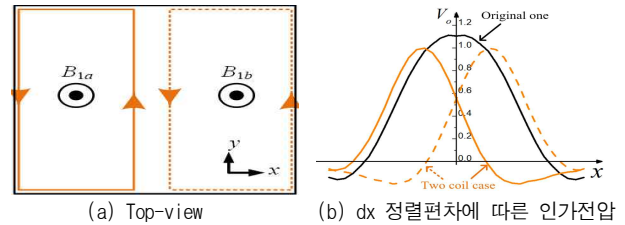
### 2. 제안하는 최적 코일구조 형상

본 논문에서는 코일 특성 분석을 위해 FEM 시뮬레이션 모델링 및 PSIM 회로 시뮬레이션 툴을 이용하였으며, 기존 코일 구조 및 사이즈는 J2954 WPT3/Z3 송수신부 공통 사항을 가정하였다. Coreloss의 실수투자율 및 허수 투자율은 코어의 데이터시트를 통해 추산하였고, Steinmetz Equation의 상수값  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 은 PSIM에서 도출된 손실과 매칭하여 적절한 값을 선정하였다. EV용 WPT는 앞뒤(=dx) 및 좌우(=dy) 정렬 편차가 75mm, 100mm가 최대 misalignment이며, 송수신부간 공극  $dz$ 는 100mm에서

250mm의 범위를 가진다. 이를 근거로 5가지의 송수신부 위치 케이스를 선정하였고 이를 중심으로 특성을 분석하였다.



(a) 기존 CR 코일 구조 (b) 제안하는 DQ 코일 구조  
Fig. 1 The conventional CR-type and proposed DQ coil structures



(a) Top-view (b) dx 정렬편차에 따른 인가전압  
Fig. 2 Characteristics of the proposed DQ coil splitting

Table 1 FEM simulation results for CR-type and DQ-type coils

| 분석 범위      | dx (mm) | dy (mm) | dz (mm) | $L_1$ (uH) | $L_2$ (uH) | $r_1$ (mHm) | $r_2$ (mHm) | k     |
|------------|---------|---------|---------|------------|------------|-------------|-------------|-------|
| $k_{max}$  | 0       | 0       | 150     | 38.4       | 40.6       | 12.2        | 15.2        | 0.221 |
| $k_{nom1}$ | 0       | 0       | 170     | 38.5       | 40.3       | 11.8        | 15.0        | 0.188 |
| $k_{nom2}$ | 75      | 100     | 170     | 39.0       | 40.2       | 12.0        | 15.0        | 0.143 |
| $k_{nom3}$ | 0       | 0       | 240     | 38.5       | 40.0       | 11.0        | 14.6        | 0.108 |
| $k_{min}$  | 75      | 100     | 240     | 38.6       | 40.3       | 11.3        | 14.7        | 0.084 |

(a) CR 코일구조 FEM 분석 결과

| 분석 범위      | $L_1$ (uH) | $L_2$ (uH) | $r_1$ (mHm) | $r_2$ (mHm) | $k_d$ | $k_q$ | $k_{dq1}$ | $k_{12}$ |
|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------|-------|-----------|----------|
| $k_{max}$  | 41.9       | 40.0       | 15.5        | 20.7        | 0.132 | 0.135 | 0.141     | 0.189    |
| $k_{nom1}$ | 41.1       | 40.0       | 15.0        | 15.6        | 0.115 | 0.117 | 0.123     | 0.164    |
| $k_{nom2}$ | 41.3       | 40.0       | 15.2        | 12.8        | 0.071 | 0.106 | 0.111     | 0.128    |
| $k_{nom3}$ | 40.6       | 40.0       | 14.7        | 12.1        | 0.071 | 0.072 | 0.065     | 0.101    |
| $k_{min}$  | 40.6       | 40.0       | 14.7        | 19.0        | 0.049 | 0.062 | 0.065     | 0.079    |

(b) DQ 코일구조 FEM 분석 결과

종래 기술인 CR 구조의 경우, 그림 1(a)와 같이 코일 중앙부에 자기장이 집중되며 좌우로 갈수록 자기장이 급격히 감소하는 구조로 인해 좌우 정렬편차 또는 대각 정렬편차 발생 시에 출력전압이 급격히 낮아지는 단점이 있다. 이는 차량이 송신스테이션과 제대로 정렬되지 않을 경우 원하는 출력전력을 얻을 수 없다는 의미이다. 본 논문에서 제안하는 최적 코일 형상은 그림 2와 같이 기존 송신부(Transmitter, Tx)의 한 개 코일을 두 개로

나눔으로써 중앙측 인가전압은 낮아지나 양쪽 인가전압은 증가함으로써 좌우정렬편차 특성을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 그림 2의 coil splitting된 코일을 2개 사용한 DQ Tx 코일을 적용하였고, 그림 1(b)와 같이 물리적 구조가 교차 다이폴 코일과 같이 직교할 경우, DQ 전류의 90 위상차에 의해 3차원 공간에 걸쳐 DQ 회전 자기장이 생성될 수 있으므로 종래 대비 균일한 자기장 분포 특성을 지니게 된다 [2]. 물리적 및 전기적으로 90도 차이를 두에 따라 공간상에 발생하는 자기장 분포도를 그림 3에 나타내었다. 그림 3과 같이 중앙측에서는 게인이 다소 낮아지나, 좌우 정렬편차에 따라 주변 자기장 크기 분포가 균등하게 됨을 FEM 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다. 따라서 중앙점에서 송수신부간 이격거리에 따라 발생하는 전압게인은 감소하나 좌우방향에서의 전압 게인이 우수하여, 좌우 정렬편차(diagonal misalignment) 발생 시 CR 코일구조 대비 균등한 전압 게인을 가져갈 수 있다는 장점이 있다.

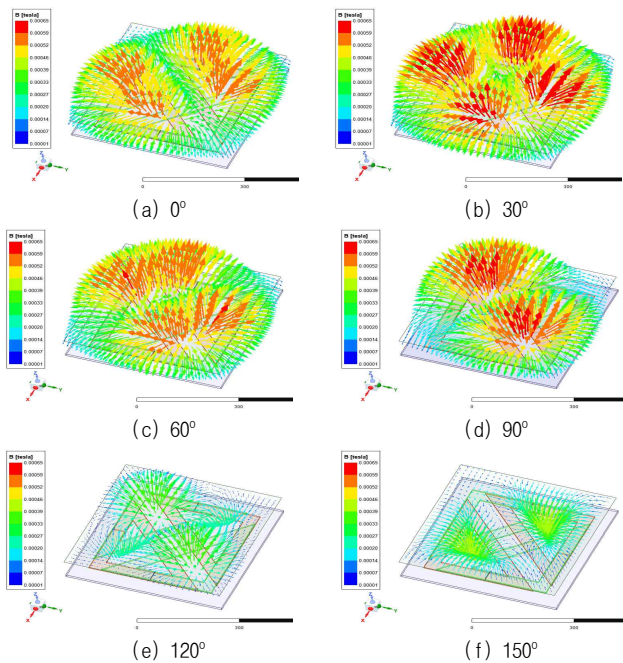


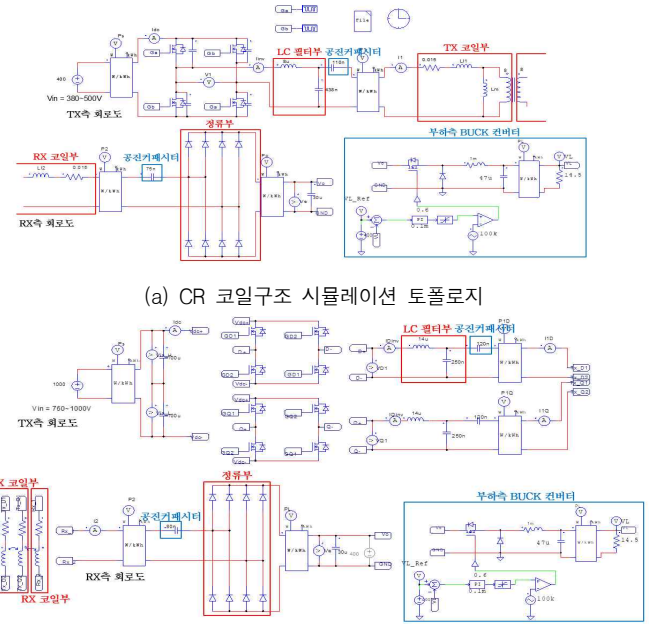
그림 3 0~150° 범위에서의 자속밀도 분포  
Fig. 3 Magnetic flux density distribution w.r.t. theta

### 3. 제안하는 최적 코일구조 제어 토폴로지

J2954 WPT3/Z3 CR 코일구조 제어 토폴로지는 그림 5(a)와 같이 LCL-S 공진 토폴로지 구조를 적용하는 것을 가정하였다 [2]. 수신측 코일에는 직렬공진을 사용하였고 송신부 정전류 생성을 통한 수신측 전압원 생성을 위해 송신측에는 LCL 토폴로지를 적용하였다. 수신부 정류기 이후 DC/DC 벅컨버터를 이용하여 출력전압을 제어하도록 하였으며, 출력은 J2954 규격과 같이 400V/11.0kW가 되도록 벅 컨버터에 14.5Ω 부하저항을 연결하였다. 이를 토대로 설계하여 시뮬레이션한 결과, 규격에 제시된 전력/전류 기준을 만족함을 확인할 수 있다 그러나 knom1 이하의 범위에서는 11kW급 출력전력이 크게 감소한다는 단점이 있으므로, 정렬편차 환경하에는 11kW 이하로 충전이 가능함을 확인하였다.

제안하는 DQ 코일구조 제어 토폴로지는 그림 5(b)와 같이 CR 코일구조 제어 토폴로지와 동일한 조건 하에서 1차측 변압기를 두 개로 늘리는 방식으로 구성하였으며, 다른 파라미터 설계는 기존 CR 코일구조와 동일하게 선정하였다. 다만, DQ

인버터 특성상 1개의 코일구동은 하프브리지로 구성이 되므로, CR타입 대비 입력 전압을 2배 증가시켜 동일한 코일전류를 생성하였다. 시뮬레이션 결과, 그림 6과 같이 정렬편차(diagonal misalignment) 발생시 제안하는 DQ코일 구조를 활용함으로써 CR 코일 대비 최대 약 25% 수준의 전력을 더 크게 전달할 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.



(b) 제안하는 DQ 코일구조 제어 토폴로지

Fig. 5 The conventional and proposed EV WPT simulation scheme

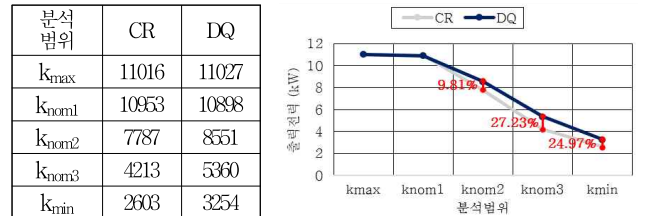


그림 6 수정된 토폴로지에서의 코일 타입별 출력전력 비교

Fig. 6 Power deviation comparison between the CR and DQ coils

### 4. 결론

본 논문에서는 좌우 정렬편차(diagonal misalignment) 발생 시 균등한 전압 게인을 가지는 새로운 DQ Tx 코일 구조를 제안하였으며, FEM 및 PSIM 시뮬레이션을 통해 기존 CR 구조 대비 우수한 허용편차 특성을 갖는 것을 검증하였다. 제안하는 DQ 구조는 WEV에서 더 넓은 좌우 정렬 허용편차를 가지므로, 종래 대비 충전 효율 및 사용자 편의성의 향상되어 정렬허용 편차 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법이라 판단된다.

### 참고 문헌

- [1] Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology, International Standard SAE J2954, 2023. [Online]. Available: [https://www.sae.org/standards/content/j2954\\_201904/](https://www.sae.org/standards/content/j2954_201904/)
- [2] Eun S. Lee et al., "Six Degrees of Freedom Wide-Range Ubiquitous IPT for IoT by DQ Magnetic Field", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 11, pp. 8260-8265, Nov. 2017.