

누설집중형 변압기를 이용한 전계결합형 무선전력전송 시스템의 부피저감 최적설계

최희수, 정채호, 최성진
울산대학교 전기공학부

Optimal Design of Volume Reduction for Capacitive-coupled Wireless Power Transfer System using Leakage-enhanced Transformer

Hee Su Choi, Chae Ho Jeong, Sung Jin Choi
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

무선전력전송에서 시스템 역률을 높이기 위한 방법으로 인덕터나 변압기를 이용한 임피던스 정합을 많이 사용하였다. 본 논문에서는 기존과는 달리 누설집중형 변압기만을 이용하여 전계결합 시스템의 링크 캐패시터와 임피던스 정합을 한다. 이는 높은 입출력 역률 값을 얻을 수 있고 시스템 공진 양호도 Q값을 턴 비를 이용해 줄일 수 있어서 기존 대비 링크 캐패시터 전압 스트레스가 적다는 장점이 있다. 누설집중형 변압기는 코어와 권선 손실을 고려해서 최적으로 설계를 진행하였고 이를 50W급 하드웨어 및 시뮬레이션으로 검증한다.

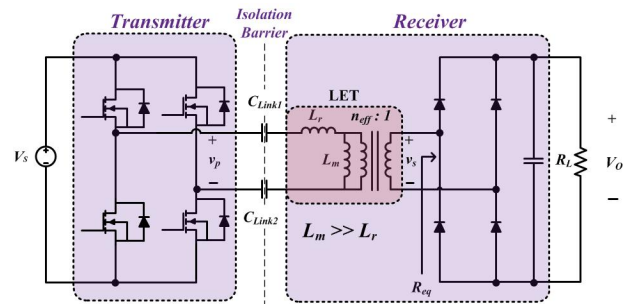


그림 1. 제안하는 전계결합 무선전력전송 구조

1. 서론

무선전력전송 시스템은 차량이나 모바일 분야에 많이 사용되고 있다. 그 중 전계결합형 무선전력전송은 다른 방식에 비해 전체 시스템 구현 비용이 저렴하며 전기장을 이용하기 때문에 비교적 안전하다는 장점이 있다. 전계결합형 시스템에서 임피던스 정합은 입출력 역률을 높이기 위해서는 필요한데 일반적으로 송·수신부를 이어주는 캐패시터의 용량 리액턴스를 보상하기 위해 인덕터와 같은 유도 리액턴스를 사용한다. 여기서 전체 시스템의 부피를 줄이기 위해서는 단순하면서 설계가 쉬운 구조가 정합구조가 필요하다.

기존 논문에서는 직렬 공진형 컨버터를 이용한 토폴로지에서 임피던스 정합용 변압기 위치를 이동시켜 각 토폴로지를 비교하였다. 그 결과 수신부에 변압기와 인덕터를 위치시키는 것이 시스템 손실이나 부피면에서 가장 적합하다는 결론을 내렸다^[1]. 본 논문에서는 여기서 나온 결론을 토대로 변압기와 인덕터를 수신부에 배치시키고 시스템 부피와 손실을 더 저감하기 위해 그림 1과 같이 수신부에만 임피던스 정합용 누설집중형 변압기(LET)를 사용하는 구조를 제안 후 손실 최적 설계한다. 제안 토폴로지는 PSIM을 통해 먼저 시뮬레이션 한 후 하드웨어 구동을 통해 시스템 전체 부피 및 손실을 기존 LCL 정합 토폴로지^[2]와 비교 분석한다.

2. 제안 토폴로지 개요 및 LET 설계

그림 1은 본 논문에서 제안하는 토폴로지이다. 그림에서 L_m 은 병렬 공진 인덕터로 직렬공진 인덕터 L_r 값보다 약 5배 크게 설계하여 거의 L_m 이 개방된 것과 같은 효과를 볼 수 있다

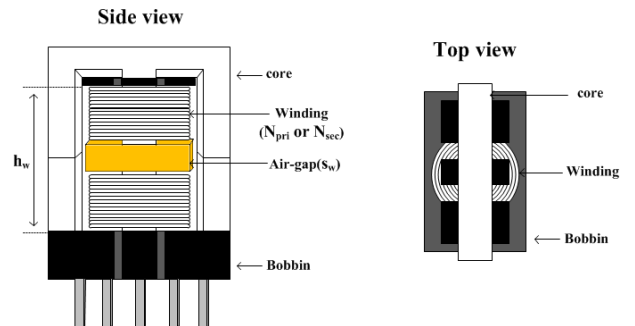


그림 2. 누설집중형 변압기 구조

록 하였다. 여기서 그림 1의 LET 등가회로는 APR(All Primary Referenced)모델을 사용했는데 APR 모델이란, 변압기의 자화 및 누설 인덕턴스 성분 모두를 1차측에 두고 해석하는 방법을 말한다. 여기서 수신부 인버터 앞에서 분 교류 등가 부하 저항은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (1)$$

이때 전압 이득식은 아래와 같다.

$$M = \frac{V_s}{V_p} = \frac{1/n_{eff}}{1 + Q^2(f_{sw}/f_o)^2 - 1} \quad (2)$$

여기서 V_p , V_s 는 각각 기본과 입력과 출력이고 n_{eff} 와 f_o , Q 는 아래와 같다.

$$n_{eff} = kN, f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_{link}}}, Q = \frac{1}{n_{eff}^2 R_{eq}} \sqrt{\frac{L_r}{C_{link}}} \quad (3)$$

여기서 N 은 2차측 턴 수(N_{sec})/1차측 턴 수(N_{pri})와 같고 식 (2)에서 스위칭 주파수 f_{sw} 가 공진주파수 f_o 와 일치할 때 최대 전압 gain은 $1/n_{eff}$ 이다.

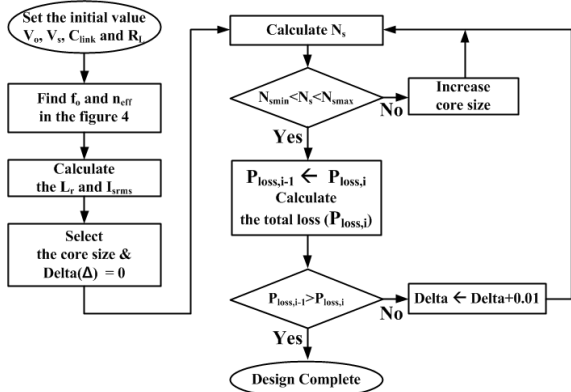


그림 3. 설계 흐름도

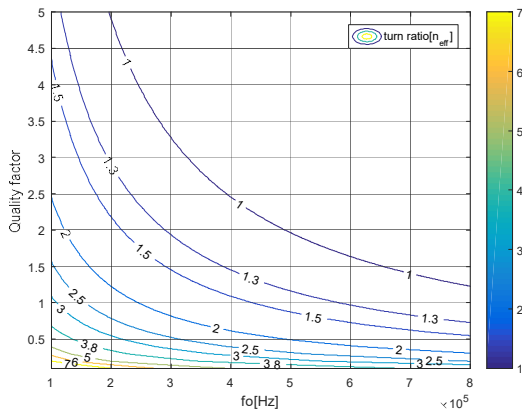


그림 4. 설계 곡선

그림 3은 본 논문에서 제안하는 누설집중형 변압기 설계 흐름도이다. 여기서 Delta는 그림 2에서 1차측과 2차측 권선사이의 거리 s_w 의 비율(0~1)이며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta = \frac{s_w}{h_w} \quad (4)$$

여기서 h_w 는 코어의 세로 길이와 같다. 설계 시 주의해야 할 점은 공진주파수와 턴 비 선정을 할 때 Q값이 너무 크면 식(5)와 같이 캐패시터 전압 스트레스가 커지고 Q값이 1보다 작으면 기본파 근사가 성립하지 않으므로 이를 고려해서 설계를 해야한다. LET 설계에서 가장 중요한 부분은 변압기 누설 성분으로 구성된 직렬 공진 인덕터 L_r 인데 이는 식(4)의 Δ 를 조절하여 설계한다. 이때 Δ 값은 아무 값이나 사용하는 것이 아니라 Δ 변화에 따른 각 손실을 고려해서 가장 손실이 작은 지점을 선정하여 사용한다. 손실 계산에서 코어 손실은 Steinmetz 방정식을 이용하였고 권선손실은 권선 소자인 구리의 표피깊이와 Dowell 커브를 이용하여 계산한다.

$$V_{C, stress} = \frac{4}{\pi} Q V_s \leq V_{C, min} \quad (5)$$

3. 시뮬레이션 및 하드웨어 결과

설계사양이 입력전압(V_s) 150V, 출력전압(V_o) 100V, 링크 캐패시턴스(C_{link}) 1nF, 부하저항(R_l) 200Ω인 경우 그림 3의 설계 절차에 따라 턴 비 n_{eff} 가 1.5 일 때 누설집중형 변압기를 설계하였는데 그 결과 EI3026S 코어에 1차측 턴 수 N_{pri} 는 45턴, 2차측 턴 수 N_{sec} 는 30턴이며 각 권선은 0.06mm/20 연선을 사

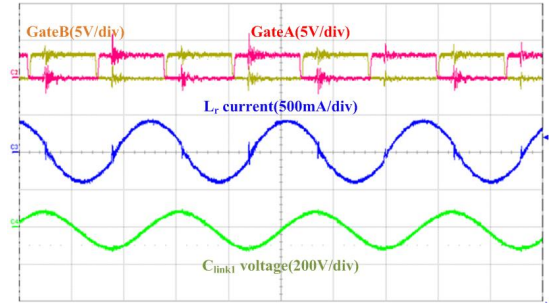


그림 5. 제안하는 토폴로지의 하드웨어 결과

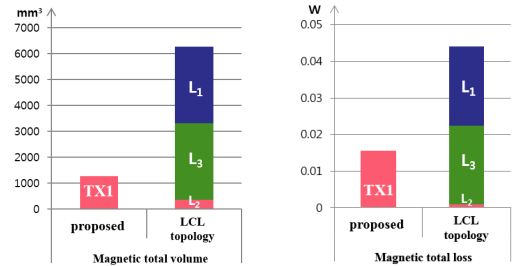


그림 6. 제안하는 토폴로지와 기존 LCL토폴로지 비교 분석

용하였다. 그 결과 LET의 직렬 공진 인덕터 L_r 의 계산 값은 281.45uH이고 측정 값은 208uH로 약 26%오차가 있다. 그림 5은 설계된 LET를 이용한 하드웨어 결과이다. 하드웨어 실험결과 입력전압 150V일 때 출력전압 95.7V, 출력전력은 45.792W로 나왔고 시스템 효율은 81.4%가 나왔다. 시뮬레이션과 실제 구동시 공진 주파수는 약 14.5% 차이가 있었다. 그림 6은 제안 토폴로지와 기존 LCL 정합 토폴로지와 비교 분석 결과이다. 각 그림에서 알 수 있듯이 제안하는 토폴로지가 기존보다 부피는 약 4배 작고 손실은 약 3배 작음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 변압기의 누설 성분을 이용해 송·수신을 연결하는 링크 캐패시터와 공진을 하였다. 다른 토폴로지에 비해 공진에 사용된 마그네틱 소자가 적어 시스템 입출력 역률이 좋을 뿐만 아니라 설계절차도 비교적 간단하다는 장점을 가지고 있고 시스템의 품질계수가 턴 비에 비해 계급 배 만큼 줄어들기 때문에 링크 캐패시터에 걸리는 전압 스트레스도 적다. 본 논문에서는 제시한 설계절차에 따른 하드웨어 결과도 포함하였는데 시스템 효율은 약 81.4%로 이는 향후 스위칭 주파수를 공진주파수 보다 조금 높게하여 각 스위치를 ZVS 구동하고 현재 링크 캐패시터를 필름 캐패시터로 캐패시터 뱅크를 사용하여 대체 실험을 하여 ESR이 높아 손실이 큰데 이는 도체를 이용하여 전극을 형성하여 캐패시터를 구성하면 지금보다 ESR이 낮아 높은 시스템 효율이 나올 수 있다.

참고 문헌

- [1] 최희수, 최성진, “임피던스 정합을 이용한 전계결합형 무선 전력전송 최적 설계 방법 연구,” 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, pp.141-142 Jul. 2016.
- [2] Michael P. Theodoridis, “Effective Capacitive Power Transfer,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.27, no.12, pp.4906-4913, Dec. 2012.