

IPT 코일 간 거리에 따른 PI-모델과 T-모델 간의 파라미터 영향성 분석

곽민준, 팡기 앤드류 느기니, 최성진
울산대학교 전기전자 컴퓨터공학과

Comparative Analysis of Inductive Wireless Power Transfer Coil Distance Sensitivity : PI vs. T Model

Min-Jun Kwak, Andrew Ngini-Mwangi, Sung-Jin Choi

Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Ulsan
Ulsan, 44610, South Korea

ABSTRACT

기존 IPT 해석에는 주로 T-모델이 활용되어 왔으나, 코일 간 거리가 변화하는 조건에서는 모델에 따라 민감도의 차이가 발생할 수 있으므로, 이에 대한 정량적 비교 및 검토가 요구된다. 본 논문에서는 코일 간 거리 변화 조건에서 T-모델과 Π -모델 각각의 해석적 특성과 파라미터 민감도를 비교·분석하였다. T-모델과 Π -모델 각각의 결합계수 의존성을 이론적으로 분석하였고, 100kHz 조건에서 송수신 코일 간 거리를 변화시키며 두 모델의 인덕턴스 및 어드미턴스의 변화와 민감도를 비교·분석하는 실험을 진행하였다. 그 결과, IPT 시스템이 일반적으로 운용되는 0.2~0.3의 결합계수에서 코일 간 거리 변화가 발생했을 때, 직렬 보상 시에는 T-모델이, 병렬 보상 시에는 Π -모델이 더 안정적인 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

1. 서론

무선전력전송(WPT) 기술은 전기차 충전, 휴대기기 등 다양한 응용에서 주목받고 있으며, 이 중 자기유도 전력전송방식(IPT)은 높은 효율과 안정성으로 인해 핵심적인 연구 주제로 자리 잡고 있다. 그러나 IPT 시스템은 송·수신 코일의 오정렬(misalignment) 시 결합계수 k 가 크게 변동하며, 이로 인해 전송 효율이 저하되고 임피던스 특성이 불안정해져, 신뢰성 있는 보상 회로 설계가 어려워진다. 기존 연구에서는 해석적 단순성과 직관성 때문에 T-모델이 IPT 분석에 널리 활용되어 왔다. 다만 T-모델은 결합계수 변화에 따라 해석 결과가 다소 민감하게 변동하는 경향을 보인다. 또한, 선행된 용량결합 전력전송(CPT) 연구에서는 오정렬 보상 상황에서 T-모델이 더 유리할 수 있음을 보여준 바 있다.^[1] 본 연구는 이러한 맥락을 바탕으로, 쌍대성 관점에서 IPT 해석에 Π -모델을 적용하였다. 특히, 실제 운용에서 자주 나타나는 결합계수 범위($k=0.2 \sim 0.3$)에서의 오정렬 조건을 대상으로 두 모델을 비교하여, 각 모델이 어떤 상황에서 더 유리하게 적용될 수 있는지를 검토하였다.

2. IPT 모델링과 거리 변화 특성 분석

2.1 모델 정의 및 파라미터 도출

본 절에서는 IPT 시스템의 송신 코일과 수신 코일 간 자기유도 결합을 전기적 등가회로로 모델링하기 위해 사용되는 T-모델과 Π -모델을 정의하고, 두 모델 간의 관계를 수식적으로 도출한다. T-모델은 반대편 단자의 개방 조건(open-circuit)을 기준으로 각 코일의 자기 인덕턴스를 정의하며, 그림 1(a)에 제

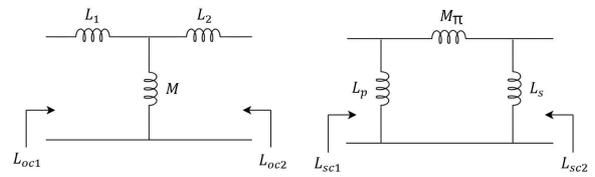


그림 1(a) T-모델 등가회로 (b) Π -모델 등가회로
시된 바와 같이 중심의 결합 인덕턴스 M 과 양단 인덕턴스 L_1, L_2 로 구성된 Y형 구조를 가진다.^[2] 송수신 코일의 개방 인덕턴스를 각각 L_{oc1}, L_{oc2} 로 두면, 상호인덕턴스 M 과 각 가지 인덕턴스 L_1, L_2 는 결합계수 k 에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$M = k\sqrt{L_{oc1}L_{oc2}} \quad (1)$$

$$L_1 = L_{oc1} - M = L_{oc1}\left(1 - k\sqrt{\frac{L_{oc2}}{L_{oc1}}}\right) \quad (2)$$

$$L_2 = L_{oc2} - M = L_{oc2}\left(1 - k\sqrt{\frac{L_{oc1}}{L_{oc2}}}\right) \quad (3)$$

여기서 L_1 과 L_2 는 각각 송수신 코일의 자기 인덕턴스에서 결합 성분이 제외된 유효 인덕턴스를 의미한다. 반면, Π -모델은 그림 1(b)와 같이 단락 조건(short-circuit)을 기준으로 정의되며, 이는 각 코일의 단락 시험(short-circuit test)에서 얻어지는 인덕턴스 값을 바탕으로 유도된다. Π -모델의 중앙 가지는 결합 인덕턴스 M_π 로 표현되며, 이는 Δ -Y 변환을 통해 k 와 단락 인덕턴스 L_{sc1}, L_{sc2} 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$M_\pi = \frac{1}{k}\sqrt{L_{sc1}L_{sc2}} \quad (4)$$

Π -모델의 양단 가지 인덕턴스 L_p, L_s 는 중앙 가지 인덕턴스 M_π 와 각 코일의 단락 인덕턴스 L_{sc1}, L_{sc2} 로부터 다음과 같이 도출된다.

$$L_p = \frac{L_{sc1}\sqrt{L_{sc2}}}{\sqrt{L_{sc2}} - k\sqrt{L_{sc1}}} \quad (5) \quad L_s = \frac{L_{sc2}\sqrt{L_{sc1}}}{\sqrt{L_{sc1}} - k\sqrt{L_{sc2}}} \quad (6)$$

따라서 Π -모델 역시 모든 파라미터가 물리적 원리를 기반으로 하며, 측정 가능한 물리적인 단락 조건을 기준으로 정의된다.

2.2 모델별 코일 간 거리 변화에 따른 민감도 분석

결합계수 k 는 송수신 코일 간 간격 및 정렬 상태에 따라 변하며 코일 간 거리 증가 시 감소하는 경향을 보인다. 본 절에서는 k 변화에 따른 각 모델의 가지 인덕턴스 변화를 비교하

고, 모델 민감도를 분석하였다. 앞서 정의한 L_1 은 수식 (2)와 같이 정의되며, 송수신 코일이 대칭 구조($L_{oc1} = L_{oc2} = L_{oc}$)일 경우, 수식 (7)과 같이 근사적으로 단순화된다.

$$L_1 \approx L_2 \approx L_{oc}(1-k) \quad (7) \quad L_p \approx L_s \approx (1-k)^{-1}L_{sc} \quad (8)$$

반면, Π -모델의 경우 대칭 구조($L_{sc1} = L_{sc2} = L_{sc}$)를 가정하면, 가지 인덕턴스 L_p 와 L_s 를 수식 (8)과 같이 단순화할 수 있다. 위 식을 통해 T -모델의 인덕턴스는 $L_1, L_2 \propto (1-k)$ 의 형태로 정의되며, 결합계수 k 가 감소함에 따라 인덕턴스가 증가하는 특성을 보인다. 반면, Π -모델의 병렬 가지 인덕턴스 $L_p, L_s \propto (1-k)^{-1}$ 는 동일한 조건에서 더 가파르게 변화하며, 이는 결합계수 변화에 대한 인덕턴스의 민감도가 T -모델보다 높음을 의미한다. 그림 2(a)와 같이 실제 IPT 시스템의 일반적 운용 영역($k=0.2 \sim 0.3$)에서도 Π -모델의 인덕턴스 변화 폭이 T -모델보다 크게 나타났으며, 이는 T -모델의 인덕턴스가 Π -모델보다 실질적인 동작 조건에서 결합 계수의 변화에 안정적임을 보여준다. 한편, 어드미턴스 관점에서 보면 인덕턴스의 역수를 취하게 되므로, $L_p, L_s \propto (1-k)$, $L_1, L_2 \propto (1-k)^{-1}$ 의 관계가 성립한다. 이에 따라 결합계수 변화에 대한 반응은 인덕턴스와 반대 경향을 보이게 되며, 어드미턴스 관점에서는 Π -모델이 T -모델보다 완만하고 안정적인 거동을 나타낸다.

3. 실험 및 결과 분석

본 장에서는 코일 간 거리 변화에 따른 개방·단락 인덕턴스, 결합계수를 측정하였다. 또한, 실험으로 얻은 데이터를 이용하여 T -모델과 Π -모델의 등가 가지 인덕턴스를 비교함으로써, 오정렬 조건에서의 모델별 민감도 차이를 분석하였다. 실험은 100kHz에서 수행되었으며, 코일의 내부 반지름과 외부 반지름은 각각 150mm, 200mm, 도체 직경은 4mm로 설정하였다. 송수신 코일 간 거리는 10.5cm부터 15.5cm까지 약 1cm 간격으로 변화시켰다. 표 1은 코일 간 거리 변화에 따른 개방·단락 인덕턴스의 측정 결과와, 이를 기반으로 계산된 각 모델의 가지 인덕턴스 값을 함께 나타낸다. 거리 D 가 증가함에 따라 L_{oc} 은 점진적으로 감소하였고, L_{sc} 은 증가하는 특성을 보였다. 이와 함께 k 또한 거리 증가에 따라 감소하는 특성을 나타냈다. L_{oc} 를 통해 구한 L_1 은 거리 증가에 따라 선형적으로 감소하였으며, k 변화에 상대적으로 완만한 변화를 보였다. 반면, L_p 는 동일한 조건에서 k 가 작아질수록 증가하는 특성을 나타냈다. 그림 2(b)로 나타난 이러한 결과는 이론과 유사함을 확인하였다. 다만, 이론식과 실험 결과 간의 미세한 오차는 L_{oc} 와 L_{sc} 를 상수로 가정한 데에서 기인한 것으로, 실제로는 거리 변화에 따라 두 인덕턴스가 변하기 때문이다. 그러나 이러한 인덕턴스 변화만으로는 모델 간 차이를 직관적으로 판단하기 어렵기 때문에, 민감도를 계산하여 비교한 결과를 그림 3(a)에 나타내었다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이, Π -모델의 민감도는 $k=0.2 \sim 0.3$ 인 전 구간에서 T -모델보다 상대적으로 높은 위치에 분포하며, 이는 Π -모델이 k 변화에 대해 더 민감하게 반응한다는 것을 의미한다. 따라서, 실제 오정렬 상황과 같이 결합계수가 변동하는 조건에서 T -모델의 인덕턴스가 Π -모델보다 더 안정적이고 예측 가능한 해석 결과를 제공함을 확인할 수 있었다. 다만, 어드미턴스 기준으로 비교했을 때, 그림 3(b)와 같이 IPT 시스템의 운용 구간에서 Π -모델의 민감도가 T -모델보다 낮아, 코일 간 거리가 변화하는 상황에서 더 유리함을 확인할

표 1 T -모델과 Π -모델의 k 및 인덕턴스 측정 결과

k(D)	0.18(15.6 5cm)	0.21(14.6 cm)	0.26(12.6 cm)	0.29(11.5 cm)	0.32(10.5 cm)
L_{oc1} (μH)	146.60	146.61	149.66	150.87	151.90
L_1 (μH)	120.21	115.82	110.12	107.12	103.30
L_{sc1} (μH)	140.30	139.00	139.54	136.20	135.00
L_p (μH)	171.10	178.21	188.51	194.57	198.53

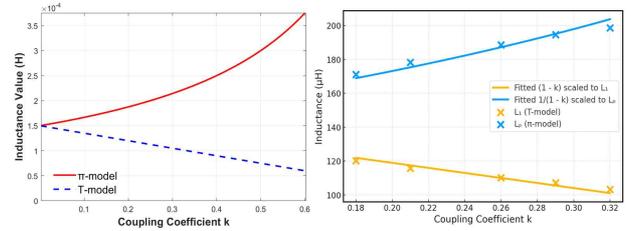


그림 2(a) 인덕턴스의 이론적 변화 (b) 실측 인덕턴스 비교

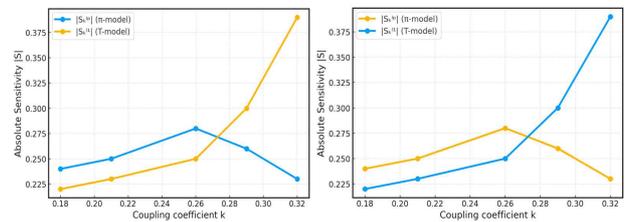


그림 3(a) k 에 따른 인덕턴스 민감도 (b) 어드미턴스 민감도 비교
수 있었다. 따라서, 등가 회로상 임피던스를 사용하는 직렬 보상 시에는 T -모델이 적합하며, 어드미턴스를 사용하는 병렬 보상 시에는 Π -모델이 더 유리한 선택임을 검증할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 코일 간 거리 변화 조건에서 T -모델과 Π -모델 기반 파라미터의 영향성을 검토하였다. 이를 위해 두 모델의 등가 인덕턴스 관계를 정립하고, 결합계수 및 코일 간 거리에 따른 인덕턴스 및 어드미턴스 변동 특성을 비교·분석하였다. Π -모델의 경우 가지 인덕턴스가 $(1-k)^{-1}$ 에 비례하여 어드미턴스의 민감도가 완화되기 때문에 어드미턴스 기반 병렬 보상 회로에서 더 안정적인 반면, 반대로 T -모델은 임피던스 기반 직렬 보상 회로 해석에 더 적합한 특성을 보였다.

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단
개인기초연구사업(RS-2023-00240194)의 지원을 받아 수행
된 연구임

참고 문헌

[1] C. T. Truong, Topology and Control for Capacitive Power Transfer System with Reduced Voltage Stress and Misalignment Compensation, Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering, University of Ulsan, 2025.
[2] J. W. Nilsson and S. A. Riedel, *Electric Circuits*, 11th ed., Pearson, 2021.