

직렬-병렬 무선 전력 전송 시스템의 DQ 동기 좌표계 모델 및 전류제어기

노은충, 이상민, 이승환
 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

DQ Synchronous Reference Frame Model of A Series-Parallel Tuned Inductive Power Transfer System and Current Controller

Eunchong Noh, Sangmin Lee, Seung-Hwan Lee
 School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

본 논문에서는 DQ 변환을 적용한 직렬-병렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 동기 좌표계 모델과 이를 이용한 전류제어기 시스템을 제안한다. 무선 전력 전송 시스템은 일반적으로 급전 측과 집전 측에 단상 전류가 흐르기 때문에 제어에 어려움이 있다. 따라서 정상 상태의 전압 및 전류의 수식을 이용하여 부하에 전달되는 전압 및 전류의 크기를 제어하는 경우가 많다. 따라서 과도 상태의 전압 및 전류의 동특성이 원하는 특성과 다르게 나타날 수 있다. 본 논문에서는 직렬-병렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 단상 전압 및 전류를 DQ 변환하여 과도 상태 및 정상 상태의 전압 및 전류의 동특성을 해석할 수 있는 등가 회로 모델을 제시하고 이를 이용하여 과도 상태 제어를 위한 고성능 전류 제어기를 제안한다.

1. 서론

자기유도 방식 무선 전력 전송(Inductive Power Transfer, IPT)은 물리적으로 분리된 두 코일간의 자기결합을 이용하여 물리적인 접촉 없이 전원에서 부하로 전력을 전송할 수 있는 기술이다^{[1][2][3]}. 이런 무선 전력 전송 기술은 사용자 편의성과 유지 보수성을 개선시킬 수 있어 가정용 기기 뿐만 아니라 산업용 및 의료용 기기에 이르기까지 다양한 분야에 이용되고 있다^{[4][5][6]}. 그러나 무선 전력 전송 시스템은 급전 측에서 집전 측의 부하 변동을 직접 측정할 수 없어 급전 및 집전 측의 전압 및 전류의 동특성을 해석하고 이를 제어하는 데 어려움이 있다. 해석을 간편하게 하기 위해 무선 전력 전송 시스템의 다양한 모델이 연구되었지만, 이 모델들은 무선 전력 전송 시스템의 정상상태 제어 시스템을 설계하는 데 집중하여 동특성을 해석하기에는 적합하지 않았다^{[7][8]}. 따라서 본 논문에서는 직렬-병렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 단상 전압 및 전류를 DQ 변환하여 과도 상태 및 정상 상태의 전압 및 전류의 동특성을 해석할 수 있는 등가 모델을 제시하고 이를 이용한 전류제어기 시스템을 제안한다.

2. 무선 전력 전송 시스템의 동기 좌표계 모델

2.1 무선 전력 전송 시스템의 DQ 동기좌표계 모델

직렬-병렬 공진 무선 전력 전송 시스템의 등가회로가 그림 1에 제시되어 있다. 이 때 공진 시스템의 품질 계수 (Quality factor)가

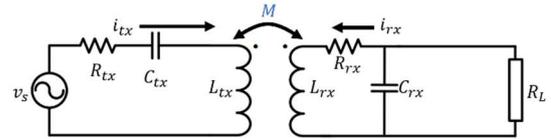


그림 1. 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템 등가회로

Fig. 1. Equivalent circuit of a SP-IPT system

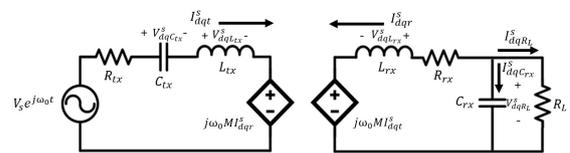


그림 2. 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템의 정지 좌표계 모델

Fig. 2. Equivalent stationary reference frame model of the SP-IPT system

충분히 높다면 시스템의 전압 및 전류는 기본 파 성분만 있다고 근사할 수 있기 때문에^[9] 그림 1의 전압 및 전류는 식과 같이 표현할 수 있다. 이 때 V_s 는 입력 전압의 피크 값이고, I_{tx} , I_{rx} 는 입력 전류의 피크 값, 그리고 ϕ_{tx} , ϕ_{rx} 는 각각 급전 측과 집전 측 전류의 전압 대비 위상각이다.

$$V_s = V_s \cos(\omega_0 t) \tag{1}$$

$$i_{tx} = I_{tx} \cos(\omega_0 t - \phi_{tx}), i_{rx} = I_{rx} \cos(\omega_0 t - \phi_{rx}) \tag{2}$$

$$i_{Crx} = C_{rx} \frac{dV_{R_L}}{dt}, i_{R_L} = \frac{V_{R_L}}{R_L} \tag{3}$$

참고문헌 [10]에 따르면 그림 1의 등가 회로에서 90° 위상 차를 갖는 가상의 회로를 설정한 후 두 회로의 전압 및 전류 성분을 합치면 그림 2와 같은 무선 전력 전송 시스템의 정지 좌표계에서의 DQ 모델을 얻을 수 있다. 이 때 그림 2에 나타난 회로의 모든 전압과 전류에 $e^{-j\omega t}$ 을 곱해주면, ω 의 속도로 회전하는 $e^{j\omega t}$ 성분을 제거하여 무선전력 전송 시스템의 동기 좌표계 모델을 얻을 수 있다.

치환한 회로가 그림 2에 제시되어 있다. 그림 2의 회로를 DQ 모델의 D축 회로라고 가정하고 D축 회로의 전압 전류를 90° lagging 하는 가상의 회로를 Q축 회로라고 가정하자, D축의 회로와 Q축의 회로를 합친 후 오일러의 공식을 적용해 복소수의 형태로 나타내면

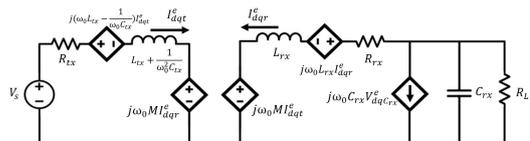


그림 3. 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템의 동기 좌표계 모델

Fig. 3. Equivalent SRF model of the SP-IPT system

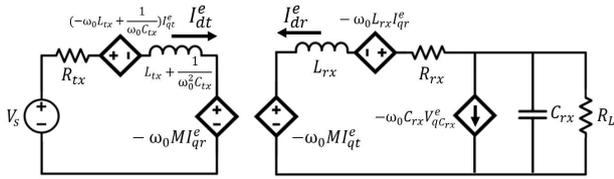


그림 4. 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템의 동기 좌표계 d축 모델
Fig. 4. D axis equivalent SRF model of the SP-IPT system

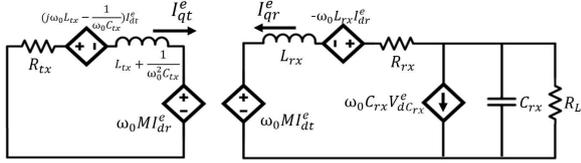
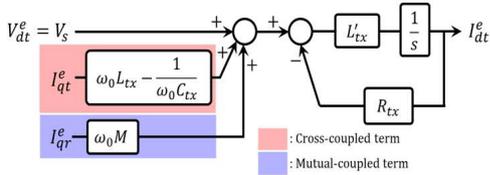


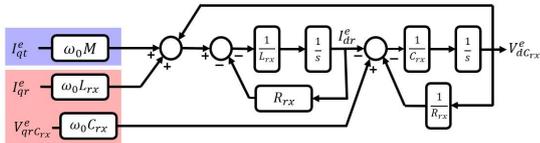
그림 5. 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템의 동기 좌표계 q축 모델
Fig. 5. Q axis equivalent SRF model of the SP-IPT system

그림 3과 같은 무선 전력 전송 시스템의 정지 좌표계에서의 DQ 모델을 얻을 수 있다.

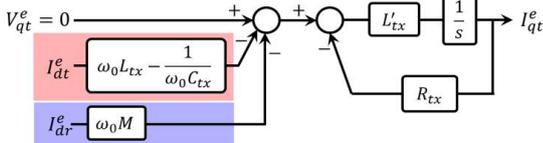
그림 3의 동기 좌표계 모델의 등가 회로에서 실수 성분과 허수 성분을 분리하여 실수 성분을 d축 회로, 허수 성분을 q축 회로라고 정의하면 그림 4와 그림 5와 같이 무선 전력전송 시스템 동기 좌표계 모델의 d축 회로와 q축 회로를 각각 얻을 수 있다.



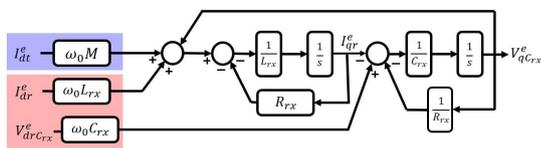
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 직렬-병렬 무선 전력전송 시스템의 동기 좌표계 모델 다이어그램:
(a) 집전 축 d축, (b) 급전 축 d축, (c) 집전 축 q축, (d) 급전 축 q축
Fig. 6. Block diagrams of SRF SP-IPT system: (a) transmitter d-axis, (b) receiver d-axis, (c) transmitter q-axis, (d) receiver q-axis

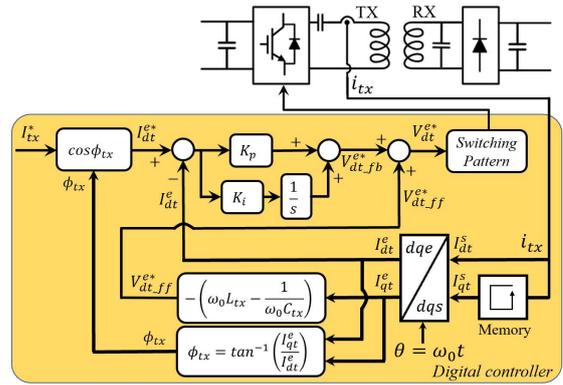


그림 7 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템의 전류제어기 모델
Fig. 7. Current controller model of a SP-IPT system

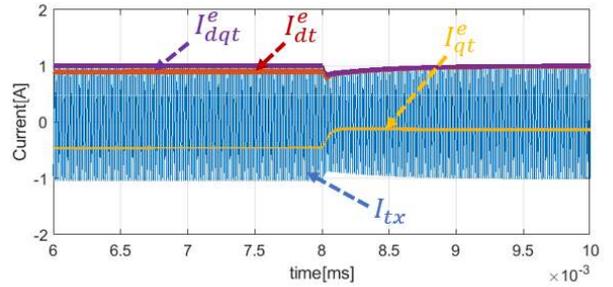


그림 8 전류제어기 시스템 시뮬레이션 파형
Fig. 8. Current controller system simulation waveform

2.2 DQ 동기 좌표계 모델을 이용한 무선 전력전송 시스템의 전류 제어기

그림 4와 그림 5의 DQ 동기 좌표계 모델은 그림 6과 같이 블록 다이어그램 형태로 나타낼 수 있다. 블록 다이어그램 형태로 나타낼 경우 제어기에 적용하기 용이할 뿐만 아니라 그림 6의 적색과 청색으로 표시된 부분처럼 cross-coupled term과 mutual-coupled term을 분리하여 나타낼 수 있으므로 시스템의 직관성을 높일 수 있다.

그림 7에는 직렬-병렬공진 무선전력전송 회로의 전류제어기 모델이 나타나 있다. 정지 좌표계의 q축 회로는 정지 좌표계 d축 회로를 90도만큼 위상 지연 시킨 것이므로 전류 센서를 이용하여 급전 축 전류를 측정하여 이 값을 정지 좌표계 d축 전류 값인 I_{dt}^e 로 설정한 후, 이 값을 메모리에 저장하여 1/4 주기 후에 메모리에서 불러올 경우 그 값은 정지 좌표계 q축 전류 값인 I_{qt}^e 로 볼 수 있다. 이렇게 얻은 정지 좌표계 모델에서의 전류 값 I_{dt}^e 와 I_{qt}^e 를 마이크로프로세서를 이용하여 동기 좌표계 모델의 전류 값인 I_{dt}^* 와 I_{qt}^* 로 변환한다. 그림 4와 그림 5에 나타난 동기 좌표계 모델의 d축과 q축은 각각 동기 좌표계 모델의 실수 성분과 허수 성분이기 때문에 이를 이용하여 급전 축의 전류 위상 ϕ_{tx} 를 구한 후 계산된 전류 위상을 이용하여 임의로 주어진 전류 지령 I_{tx}^* 를 동기 좌표계 모델 지령 값인 I_{dt}^* 로 변환할 수 있다. 이를 이용하여 d축 전류의 오차를 계산하여 PI 제어기를 거쳐 구한 전압 값을 q축 회로와의 cross-coupled term에 해당하는 성분인 $V_{dt,ff}^{e*}$ 를 제거하여 나온 값을 이용하여 스위칭 패턴을 만들어 내면 제안하는 DQ 동기 좌표계 모델을 이용한 전류 제어기 시스템을 구현할 수 있다.

이를 검증하기 위해 과도상태 응답 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1의 파라미터를 가지고 62kHz에서 동작하는 직렬-병렬 무선전력 전송 시스템에서 전류 지령을 1A로 유지 한 채 부하를 10 Ω에서

20 Ω으로 급변 시켰고, 그 결과는 그림 8과 같다. 시뮬레이션 결과 DQ 모델을 이용한 전류 제어가 성공적으로 수행되어 DQ 모델을 이용한 전류제어기 모델이 타당함을 확인하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value	Parameters	Value
L_x	151 [μH]	L_x	28 [μH]
C_x	48 [nF]	C_x	263 [nF]
R_x	260 [$m\Omega$]	R_x	67 [$m\Omega$]
k	0.25	M	16 [μH]

3. 결론

본 논문에서는 무선 전력전송 시스템의 단상 전압과 전류를 이용하여 DQ 변환 한 후 이를 이용하여 만든 전류 제어기 시스템을 제안하였다. 무선 전력 전송 시스템의 DQ 동기 좌표계 모델은 정상 상태 뿐만 아니라 과도 상태 영역까지 해석 가능하므로 이를 전류 제어기에 적용 할 시 정상 상태 영역과 과도 상태 영역을 모두 제어 할 수 있는 성능 높은 제어기를 만들 수 있음을 보였다.

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었음. (2017R1C1B5074047)

참고 문헌

[2] S. Y. R. Hui, W. Zhong and C. K. Lee, "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," in *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Sept. 2014.

[3] G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications," in *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 28-41, 2013.

[4] S. Lee, B. Lee and J. Lee, "A New Design Methodology for a 300-kW, Low Flux Density, Large Air Gap, Online Wireless Power Transfer System," in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 4234-4242, Sept.-Oct. 2016.

[5] K. Agarwal, R. Jegadeesan, Y. Guo and N. V. Thakor, "Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics," in *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 10, pp. 136-161, 2017.

[6] O. C. Onar, S. L. Campbell, L. E. Seiber, C. P. White and M. Chinthavali, "A High-Power Wireless Charging System Development And Integration for A Toyota RAV4 Electric Vehicle," *2016 IEEE Transp. Electrifi. Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, 2016, pp. 1-8.

[7] H. Hao, G. A. Covic and J. T. Boys, "An Approximate Dynamic Model of LCL-T-Based Inductive Power Transfer Power Supplies," in *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 29, no.

10, pp. 5554-5567, Oct. 2014.

[8] S. Wang *et al.*, "Modeling And Control Methods of Dynamic Wireless Power Transfer System," *2017 IEEE Transp. Electrifi. Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Harbin, 2017, pp. 1-4.

[9] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. 2001.

[10] E. Noh, S. Lee, and S. Lee, "DQ Synchronous Reference Frame Model of An SP topology Inductive Power Transfer System," in *2019 KIPE General Meeting & Autumn Conference*, Seoul, 2019, pp. 85-86.