

변압기의 기생 커패시터를 고려한 하이브리드 변압기의 소신호 모델링과 제어기 영향 분석

정권교, 허경욱, 임재욱 정지훈
울산과학기술원 전기공학과

Small-Signal Modeling and Controller Impact Analysis of Hybrid Transformers Considering Parasitic Capacitance of Transformers

Gwongyo Jung, Kyungwook Heo, Jae-Wook Lim, Jee-Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) Department of Electrical Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 하이브리드 변압기의 안정적인 동작을 위해 변압기의 기생 커패시터 성분을 고려한 소신호 모델링을 제안하고, 주파수 해석에 근거한 제어기를 설계하여 그 성능을 분석하고자 한다. 기존 계통에서는 DVR, UPQC와 같은 전력 변환 장치를 기반으로 전력 품질 유지를 하고 있다. 이러한 장치들은 큰 전력을 다루므로 높은 정격전압의 전력 스위치가 요구되어 낮은 신뢰성 및 경제성을 가진다. 이를 극복하기 위하여 기존의 변압기에 일부의 전력만 제어하여 다양한 기능을 구현할 수 있는 하이브리드 변압기가 연구되고 있다. 기존 하이브리드 변압기의 소신호 모델은 누설 인덕턴스 성분과 도선 저항만을 고려하여 기생 커패시터 성분에 의한 동특성을 반영하지 못하고 전체 전력 변환 시스템의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 하이브리드 변압기의 정확한 동특성을 반영하기 위해 변압기의 기생 커패시터를 고려하여 소신호 모델링을 유도하고 이를 기반으로 제어기 설계 및 모델의 정확성을 회로 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

기존 배전용 변압기에서 Seg나 Swell 같은 전력품질의 저하가 발생했을 때 DVR, UPQC 외에도 기계식 전력 보상 장치인 OLTC를 사용했다. 하지만 OLTC는 물리적 한계로 인해 정밀한 전압조정의 어려움과 동작횟수가 정해져 있다. 따라서 이와같은 OLTC의 문제를 보완할 수 있는 하이브리드 변압기가 연구되고 있다.^[1] 하이브리드 변압기는 수동 전기기기인 변압기와 전력변환장치가 연결된 구조이다. 특히 OLTC의 해상도 및 동작횟수 이슈를 해결할 수 있고, 전력변환장치의 제어를 통해 다양한 기능을 추가할 수 있다.

본 논문에서는 하이브리드 변압기의 구조중 그림 1과 같은 혼합구조의 자기 결합 방식을 이용한 구조를 사용한다. 이 구조는 변압기의 결선을 추가하여 변압기 용량의 10%를 보상한다. 전력품질 보상에 사용되는 컨버터는 AC-DC, DC-AC 컨버터로 이루어진 백투백 컨버터를 사용한다. 기존 하이브리드 변압기에 관한 연구에서는 기생 커패시터에 의한 영향을 고려하지 않고 제어기를 설계해 하이브리드 변압기를 설계하였다.^[1] 하지만 SiC와 같은 전력용 반도체가 발전함에 따라 높은 스위칭 주파수가 가능하여, 컨버터와 결합하는 변압기의 기생 커패시터 성분이 컨버터 동작 안정성에 영향을 미칠 수 있다.

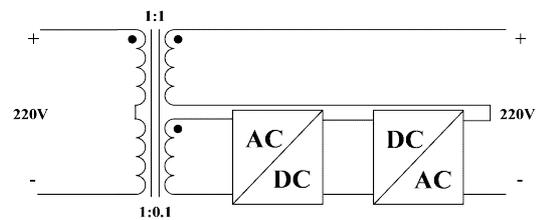


그림 1 전력보상을 위한 하이브리드 변압기 구조
Fig. 1 Hybrid Transformer Structure for Power Compensation

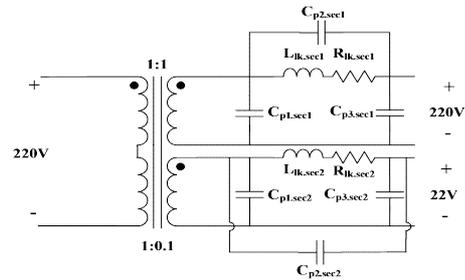


그림 2 기생 커패시터를 고려한 변압기 등가모델
Fig. 2 Transformer Equivalent Model Considering Parasitic Capacitors

본 논문에서는 하이브리드 변압기의 입력단인 AC-DC 컨버터의 소신호 모델링을 통해 변압기의 기생성분에 따른 컨버터의 동특성에 대해 분석하고 변압기의 누설 인덕턴스와 저항만을 고려했을때와 차이를 시뮬레이션을 통해 비교해 기생 성분에 의한 영향을 확인하고자 한다.

2. 모델링을 위한 등가회로

2.1 변압기의 등가회로

하이브리드 변압기에 결선의 층과 층 사이가 하나의 커패시터로 존재하고 이는 변압기의 기생 커패시터 성분으로 보여진다. 2차측에서 보여지는 커패시터들을 그림 2와 같이 C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} 로 등가화 하여^[2] 변압기의 커패시터 성분에 의한 영향을 확인하고자 한다.

2.2 변압기 기생 성분을 고려한 AC-DC 컨버터의 등가회로 및 제어기

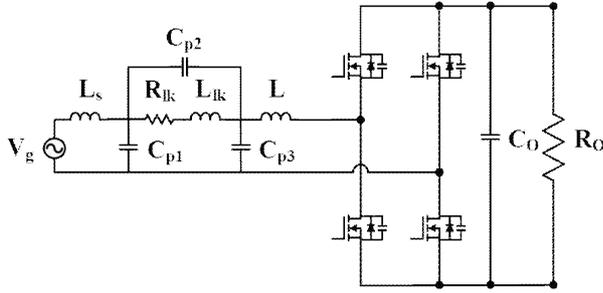


그림 3 기생커패시터와 누설 인덕턴스가 포함된 AC-DC 컨버터
Fig. 3 AC to DC converter with parasitic capacitor and leakage inductance

하이브리드 컨버터의 입력단 AC-DC 컨버터에 변압기의 기생 커패시터 C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} 와 입력 도선에 존재하는 인덕턴스 L_s 를 고려하여 그림과 같이 컨버터를 등가화 시켜 소신호 모델링을 하였다.

그림4는 하이브리드 변압기의 AC-DC 컨버터의 기생 커패시터에 의한 동특성을 확인하기 위한 제어기이다. 입력전류는 DQ 변환에 의해 각각 I_d 와 I_q 로 나누어지고, 출력전압은 PI 제어기를 통해 $I_{d,ref}$ 를 형성한다. PI 제어기를 사용해 I_d 와 I_q 를 제어하고 제어된 I_d , I_q 와 PLL을 통해 계산된 위상을 이용해 단위 역률 제어를 수행한다.

3. 소신호 모델링

3.1 AC-DC PFC의 소신호 모델링

AC-DC 컨버터의 소신호 모델 변수 성분으로는 기생캡 C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} 와 누설 인덕턴스 L_{lk} 와 누설 저항 R_{lk} , 컨버터의 인덕터 L 와 커패시터 C 를 사용한다. 각 스위칭 모드에서의 미분방정식을 활용하여 상태공간 평균 모델을 구한다. 스위칭 동작을 결정하는 시비를 변조 방식을 수정된 단극 변조로 정하고 KVL과 KCL을 이용하여 미분방정식을 구한다. 식 (1)과 (2)는 부하에 전압이 전달되는 스위칭 모드에서의 미분방정식이다.

$$\frac{dI_{lk}}{dt} = -\frac{r_{lk}}{L_{lk}}I_{lk} - \frac{1}{L_{lk}}V_{c_{p1}} + \frac{1}{L_{lk}}V_{c_{p3}} \quad (1)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_{c_{p3}} + \frac{1}{L}V_o$$

$$\frac{dI_g}{dt} = -\frac{1}{L_s}V_{c_{p3}} + \frac{1}{L_g}V_g$$

$$\frac{dV_{c_{p1}}}{dt} = \frac{CP - C_{p3} - C_{p1}}{CP \times C_{p3}}I_{lk} + \frac{1}{CP}I_L + \frac{CP - C_{p3}}{CP \times C_{p1}}I_g \quad (2)$$

$$\frac{dV_{c_{p3}}}{dt} = -\frac{CP + C_{p3} + C_{p1}}{CP \times C_{p3}}I_{lk} + \frac{CP - C_{p1}}{CP \times C_{p3}}I_L + \frac{1}{CP}I_g$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{1}{R_o \times C_o}V_o$$

$$CP = \frac{C_{p3} \times C_{p1}}{C_{p2}} + C_{p1} + C_{p3}$$

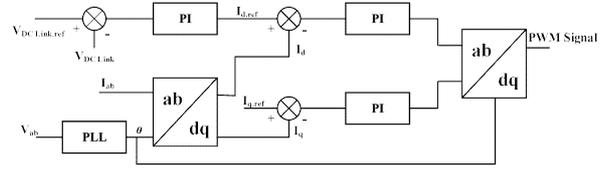


그림 4 적용된 제어기
Fig. 4 Applied controller

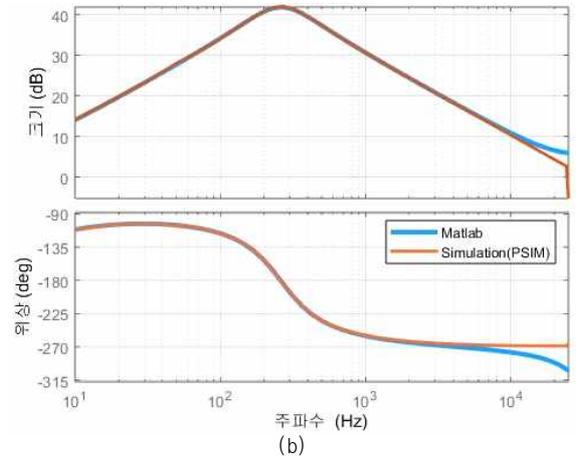
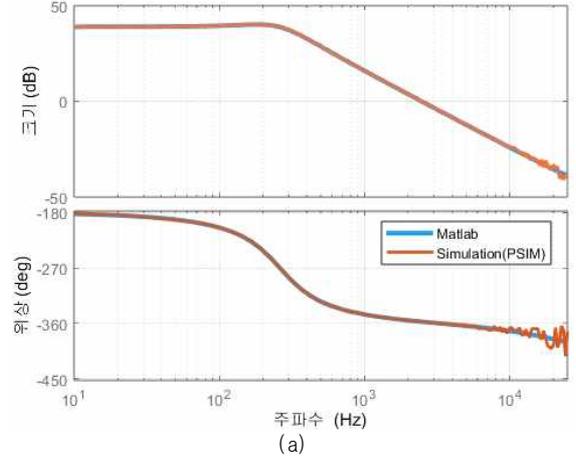


그림 5 (a) 제어변수 대 출력 전압 주파수 응답
(b) 제어변수 대 인덕터 전류 주파수 응답
Fig. 5 (a) Duty to output voltage frequency response
(b) Duty to inductor current frequency response

V_g	C_{p1}	C_{p2}	C_{p3}	R_{lk}	L_{lk}
31 V	10pF	10pF	10pF	0.5Ω	3.85μH
L	C_o	R_o	D	V_o	f_s
300μH	600μH	155Ω	0.7	31 V	50kHz

표 1 모델링을 위한 변수 값
Table 1 parameter values for modeling

식(1)의 미분방정식을 이용하여 평균화를 거쳐 상태행렬A와 입력행렬B, 출력행렬C를 구하였다.

소신호 모델링을 이용해 유도한 상태공간 방정식 (3)을 식 (4)에 적용하여 소신호 모델을 구하면 그림5의 주파수 응답 곡선을 나타낼 수 있다. Matlab을 이용해 얻은 주파수 응답 곡선과 PSIM의 AC SWEEP을 이용하여 얻은 주파수 응답곡선을 비교했을 때 모델링의 정확성을 확인했다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{r_{lk}}{L_{lk}} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{lk}} & \frac{1}{L_{lk}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & \frac{D}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ \frac{CP - C_{p3} - C_{p1}}{CP \times C_{p3}} & \frac{1}{CP} & \frac{CP - C_{p3}}{CP \times C_{p1}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{CP + C_{p3} + C_{p1}}{CP \times C_{p3}} & \frac{CP - C_{p1}}{CP \times C_{p3}} & \frac{1}{CP} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_o \times C_o} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L_s} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$X = \begin{bmatrix} I_{lk} & I_L & I_g & V_{c_p} & V_{c_n} & V_o \end{bmatrix}^T \quad \dots(3)$$

$$sX = A \cdot X + BV_g \quad (4)$$

$$Y = C \cdot X$$

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 주파수 영역에서 기생 성분에 의한 영향

배전용 변압기의 경우 수십 nF의 기생 커패시터를 갖는다고 알려져 있다.^[3] 하이브리드 변압기의 경우 일반적으로 사용되는 변압기보다 더 큰 부피를 가지고 있으므로 더 큰 기생 성분을 가진다. 그림6은 기생캡 100pF부터 1uF까지 증가 시켰을 때 영점이 저주파 쪽으로 내려오는 것을 확인 할 수 있다. 설계한 AC-DC 컨버터의 스위칭 주파수는 50kHz로 나이퀴스트 주파수인 25kHz내에서 동특성에 영향을 미치는 커패시턴스 값은 1uF 이상으로 실제로는 매우 큰값이다. 따라서 기생 커패시턴스에 의한 영향이 없는 것을 확인했다.

4.2 시간 영역에서 기생 성분에 의한 영향

시뮬레이션을 이용해 시간영역에서의 계단 응답 특성을 비교하여 그림 7에 나타내었다. 제어기 설계 후 계단 응답에서도 변압기의 기생성분을 포함한 모델과 누설 성분만을 고려한 모델 간의 유의미한 차이를 확인할 수 없다. 따라서 기생 성분을 고려한 모델이 컨버터의 동특성에 영향을 주지 않는다고 판단 된다.

5. 결론

본 논문에서는 하이브리드 변압기의 기생성분을 고려한 AC-DC 컨버터의 동특성을 소신호 모델을 유도하여 시뮬레이션과 비교하였다. 또한 소신호 모델을 이용하여 제어기를 설계하였으며 계단 응답 시뮬레이션을 통해 컨버터의 동특성을 비교하였다. 결과적으로 변압기의 기생성분을 고려하더라도 누설 성분만을 고려한 모델과 비교했을 때 나이퀴스트 주파수 내에서 기생 커패시터가 주는 영향이 없음을 검증하였다.

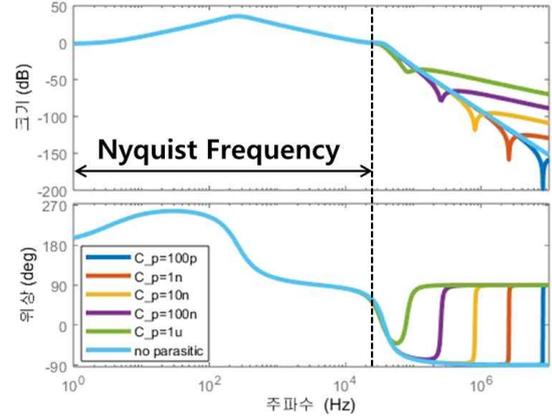


그림 6 기생 커패시턴스의 변화에 따른 제어변수 대 인덕터 전류 주파수 응답

Fig. 6 Duty to inductor current frequency according to changes in parasitic capacitance

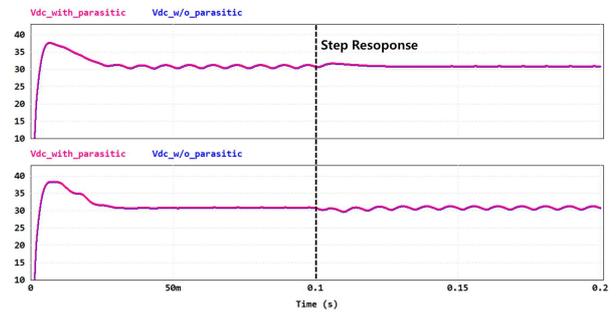


그림 7 90%에서 10%의 계단 부하 응답에 대한 출력전압(위)
10%에서 90%의 계단 부하 응답에 대한 출력전압(아래)

Fig. 7 Output voltage for 90% to 10% stair load response (above)
Output voltage for 10% to 90% stair load response (below)

본 연구는 산업통상사업부(MOITE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20222020900101)

참고 문헌

- [1] 진태훈, 조영훈.(2021).전력품질 보상을 위한 하이브리드 변압기 설계 및 제어.전력전자학회 학술대회 논문집,(0),227-229.
- [2] Liu, Chen, et al. "Experimental extraction of parasitic capacitances for high-frequency transformers." IEEE Transactions on Power Electronics 32.6 (2016): 4157-4167.
- [3] Abd-Allah, M. A., Mahmoud N. Ali, and A. Said. "Towards an accurate modeling of frequency-dependent wind farm components under transient conditions." WSEAS Transactions on Power Systems 9 (2014): 395-407.