

동력분산형 고속철도의 단상 병렬 AC/DC PWM 컨버터를 위한 승압형 인덕턴스의 실시간 추정

Real-Time Estimation of the Boost Inductance in a Single-phase AC/DC parallel PWM converter for High-speed EMU

정환진* 박병건** 현동석***
Jung, Hwan-Jin Park, Byoung-Gun Hyun, Dong-Seok

ABSTRACT

This paper proposes a real-time estimation of the boost inductance in a single-phase AC/DC parallel PWM converter for high-speed EMU. The estimation procedure of the boost inductance is only based on the variation of input current and the input AC voltage measurement. The estimated boost inductance is optimized by the least square method. This estimation technique can improve the performance of current controller and reduce the harmonics of the input current in the feed-forward controller. The validity of proposed technique is verified through the MATLAB SIMULINK simulation results.

1. 서 론

단상 병렬형 PWM 컨버터는 동력 분산형 고속철도의 주 전력변환시스템으로 사용되어진다. 입력 전압보다 더 큰 전압을 얻고 철도의 무게를 감소시키기 위하여 PWM 컨버터는 변압기의 2차측 누설 인덕턴스를 승압용 인덕터로 사용한다. 시스템의 대용량화와 입력 전류를 더 정현파에 가깝게 하기 위하여 PWM 컨버터는 두 컨버터의 캐리어를 90도 위상차를 두어 제어하는 Interlacing 기법에 의해 병렬로 운전되어진다. 병렬운전은 입력 전류의 고조파를 줄이고 시스템의 안정성을 향상시키며 출력 측의 리플을 줄이고 컨버터의 용량을 증가시킬 수 있다.[1] 단상 PWM 컨버터는 병렬로 운전 시 각각의 컨버터의 승압용 인덕턴스가 같다는 가정 하에 제어가 이루어진다. 하지만 각각의 승압용 인덕턴스는 변압기의 운전환경에 의해 변화되어질 수 있다.[2-3] 만약, 승압용 인덕턴스의 값이 변화되어 서로 다른 값을 가지게 되면 입력 전류의 고조파를 증가시키고 인접한 2차 측 권선 사이의 간섭 효과를 발생 시킨다.[4-7] 그러므로 PWM 컨버터의 제어에 있어서 중요한 역할을 하는 승압용 인덕턴스의 변화에 대한 실시간 추정은 필요하다. 이러한 승압용 인덕턴스 추정을 통하여 시스템의 전류제어와 비간섭 알고리즘에 적용한다면 시스템 특성이 향상될 수 있다.

본 논문은 변압기 운전환경에 의해 변화되어지는 승압용 인덕턴스를 실시간으로 추정하는 기법을 제안하였다. 제안된 추정기법은 측정된 입력 교류 전압과 PWM 모드에 의한 전채 도통 모드 중에서 환류 모드에서의 컨버터 입력 전류 변화 분을 검출함으로써 이루어진

* 한양대학교 전기공학과 석사과정, 비회원
E-mail : maekae0708@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0341 FAX : (02)2220-0570
** 한양대학교 전기공학과 박사과정, 정회원
*** 한양대학교 전기공학과 교수, 정회원

다. 추정된 승압용 인덕턴스는 최소자승법에 의해 최적화되어진다. 제안한 기법을 통해 추정된 승압용 인덕턴스를 제어기의 변수 값으로 실시간 적용 시 시스템 특성의 향상을 가져온다. 제안된 기법의 타당성은 MATLAB SIMULINK 시뮬레이션의 결과를 통하여 증명하였다.

2. 단상 병렬형 AC/DC PWM 컨버터

단상 병렬형 PWM 컨버터는 그림 1과 같이 IGBT, 역병렬 환류 다이오드와 승압용 인덕터로 구성되어 있다. 컨버터의 출력 측은 직류 전압을 제공하기 위하여 높은 용량을 가지는 커패시터로 연결되어 있다.

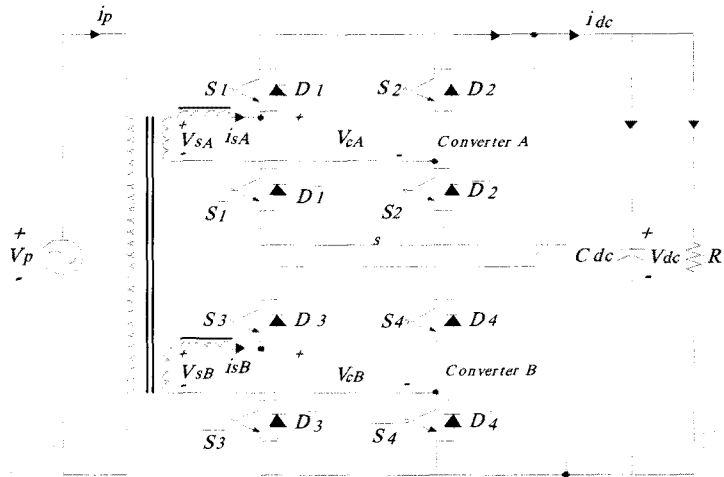


그림 1. 단상 병렬 AC/DC PWM 컨버터 시스템

그림 1의 단상 병렬형 PWM 컨버터에 대한 전압 방정식은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_{lsA} & 0 \\ 0 & R_s + PL_{lsB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{cA} \\ V_{cB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $P = \frac{d}{dt}$ 이고 R_s 는 2차 측 권선 저항이다.

컨버터 입력 전압 V_{cA}, V_{cB} 는 식 (2)와 같이 스위칭함수 S_A, S_B 와 출력 전압 V_{dc} 에 의해 결정되어진다. 컨버터 A와 컨버터 B의 스위칭 함수 S_A, S_B 는 -1, 0, 1의 값을 갖는다.

$$\begin{cases} V_{sA} = (S_1 - S_2) V_{dc} = S_A V_{dc} \\ V_{sB} = (S_3 - S_4) V_{dc} = S_B V_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

PWM 컨버터의 출력전류는 식 (3)과 같이 컨버터의 스위칭 함수들과 입력 전류 i_{sA}, i_{sB} 에 의해 결정되어진다.

$$i_{dc} = S_A i_{sA} + S_B i_{sB} \quad (3)$$

PWM 컨버터의 출력 전압은 식 (4)에 의해 계산되어진다.

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (4)$$

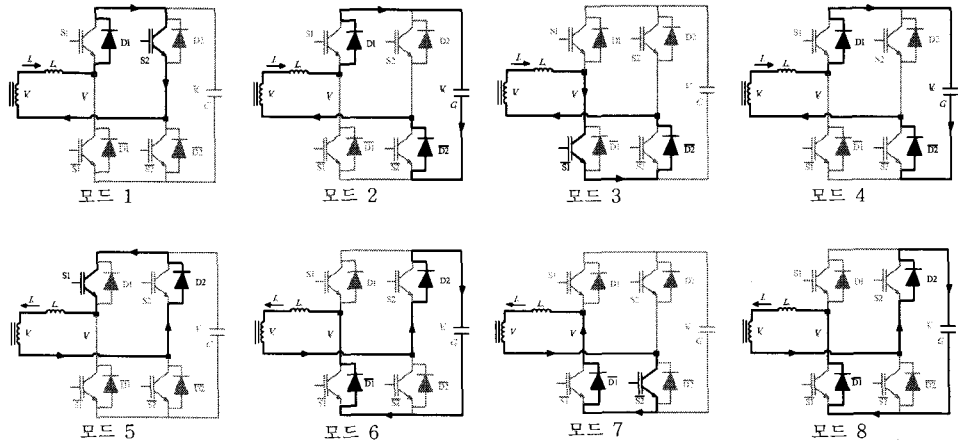


그림 2. PWM 제어에 의한 도통모드

식 (1)에서 (4)로부터 병렬형 PWM 컨버터의 상태 방정식이 식 (5)와 같이 구성된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{dc} \\ I_{sA} \\ I_{sB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_{dc}} & \frac{S_A}{C_{dc}} & \frac{S_B}{C_{dc}} \\ -\frac{S_A}{L_{lsA}} & -\frac{R}{L_{lsA}} & 0 \\ -\frac{S_B}{L_{lsB}} & 0 & -\frac{R}{L_{lsB}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{cA} \\ V_{cB} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 제안한 승압용 인덕턴스의 추정 방법

3.1. 승압용 인덕턴스를 추정하기 위한 도통모드의 결정

변압기의 승압용 인덕턴스의 값을 추정하기 위하여 컨버터의 동작 모드를 분석하는 것이 필요하다. PWM 제어에 의한 컨버터의 전체 도통모드는 그림 2와 같이 8가지 모드로 구성된다. 이러한 컨버터의 도통모드는 환류 모드와 전력 공급 모드로 나눌 수 있다. 환류 모드는 모드 1, 3, 5, 그리고 7로 구성되어진다. 전력 공급 모드는 모드 2, 4, 6, 그리고 8로 구성된다. 우리는 스위치와 다이오드를 통하여 전류가 흐르는 환류 모드에서만 승압용 인덕턴스 값의 추정이 이루어진다.

3.2. 승압용 인덕턴스의 계산 방법

승압용 인덕턴스를 추정하기 위한 환류 모드에서의 스위치의 상태는 동작하는 모드에 따라 표 1과 같이 나타내어진다. 환류 모드에서 전압 방정식은 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_s(t) = L_s \frac{di_s(t)}{dt} + R_s \times i_s(t) \quad (6)$$

식 (6)은 승압용 인덕턴스에 대한 식 (7)로 재구성할 수 있다. 승압용 인덕턴스인 L_s 는 입력 전류의 변화분을 계산하여 입력 교류 전압을 추출함으로써 식 (7)과 같이 추정되어 질 수 있다.

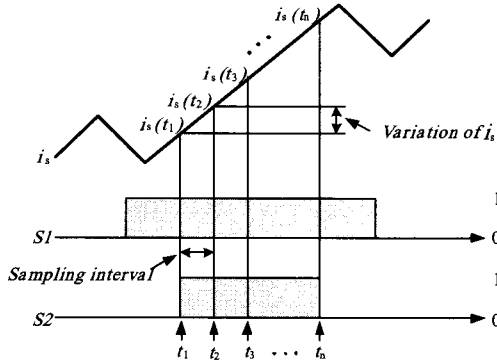


그림 3. 스위치 S_1 과 S_2 가 턴-온 일 때 샘플링 구간과 컨버터 입력 전류의 변화분을 추출하는 파형

$$L_s = [V_s(t) - R_s \times i_s(t)] \times \frac{dt}{di_s(t)} \quad (7)$$

입력 전류의 변화분과 샘플링 구간을 얻기 위하여 그림 3과 같이 파형을 분석하는 것이 필요하다. 샘플링 구간, t_{samp} 는 $t_n - t_{n-1}$ 이고 입력 전류 i_s 의 변화분은 $i_s(t_n) - i_s(t_{n-1})$ 이다. 식 (7)로부터 그림 3을 통하여 식 (8)을 얻어낼 수 있다.

$$L_s(n) = [V_s(t_n) - R_s \times i_s(t_n)] \times \frac{t_{samp}}{i_s(t_n) - i_s(t_{n-1})} \quad (8)$$

3.3. 최소자승법에 의한 승압용 인덕턴스의 최적화

만약 매 샘플링 시간 t_n 에서 데이터의 측정치 $L_s(n)$ 을 n 번 추출한다면, 우리는 최소자승법을 사용함으로써 최적의 추정을 구할 수 있다.

$$\hat{L}_s(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_s(n) \quad (9)$$

변수 $\hat{L}_s(n)$ 은 계산된 최적의 상수이다.

최소자승법에서 측정된 데이터의 집합에 적합한 최적의 상수를 보여주는 식 (9)는 단순히 측정치의 평균값이다.

$$J_N = \sum_{n=1}^N [\hat{L}_s(n) - L_s(n)]^2 \quad (10)$$

J_N 은 측정치와 추정치 사이의 차이 또는 모든 오차의 합의 제곱이다. J_N 은 식 (10)에 의한 최적의 추정을 위하여 최소화되어야만 한다. 그리고 나면 승압용 인덕턴스의 추정치는 최소자승법을 사용함으로써 가장 좋은 안정성을 가지게 된다.

4. 시뮬레이션 분석

제안한 승압용 인덕턴스 추정 방법의 우수한 성능을 입증하기 위하여 MATLAB SIMULINK을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 고려된 시스템 파라미터들은 표 2에 주어져 있다. 시뮬레이션 조건은 0.7초에서 승압용 인덕턴스 값이 변화되어지며

표 1

환류 모드에서 스위치 상태에 대한 동작 모드

스위치 모드	$V_s > 0$		$V_s < 0$	
	모드 1	모드 3	모드 5	모드 7
S_1	ON	OFF	ON	OFF
S_2	ON	OFF	ON	OFF
$\overline{S_1}$	OFF	ON	OFF	ON
$\overline{S_2}$	OFF	ON	OFF	ON

표 2
시스템 파라미터

시스템 파라미터	Values
입력 전압 (V_s)	1400Vrms
출력 전압 (V_{dc})	2800V
1차측 누설 인덕턴스 (L_p)	0.8mH
2차측 누설인덕턴스 (L_{sA} , L_{sB})	2mH / 1mH
스위칭 주파수 (f_{carr})	540Hz

1.5초에서 부하변동이 발생한다. 그림 4의 (a)는 컨버터 A의 입력전류; i_{sA} 그리고 컨버터 B의 입력전류; i_{sB} 를 보여준다. 입력 전류 i_{sA} , i_{sB} 는 0.7초에서 변하는 파형을 볼 수 있다. 그림 4의 (b)는 2차측과 3차측의 인덕턴스의 추정된 값을 보여주며 변화된 값을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 0.7초에서 2mH, 1mH로 추정되어지는 것을 보여준다. 그림 4의 (c)는 0.7초에서 승압용 인덕턴스의 값이 변화될 때, 입력 전류와 입력 전압을 보여준다. 전체적인 시스템 역률제어가 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그림 5의 (a)는 1.5초에서 부하가 50% 증가되었을 때 입력 전류 i_{sA} , i_{sB} 가 변하는 파형을 볼 수 있다. 그림 5의 (b)는 부하가 50% 증가되었을 때 2차측과 3차측의 누설 인덕턴스는 정확하게 2mH, 1mH로 추정된다. 승압용 인덕턴스들은 0.7초에서 2mH, 1mH로 추정되어져있다. 그림 5의 (c)는 1.5초에서 부하 변동이 발생했을 때 역률 제어가 잘 이루어지는 입력 전류와 입력 전압의 파형을 보여준다.

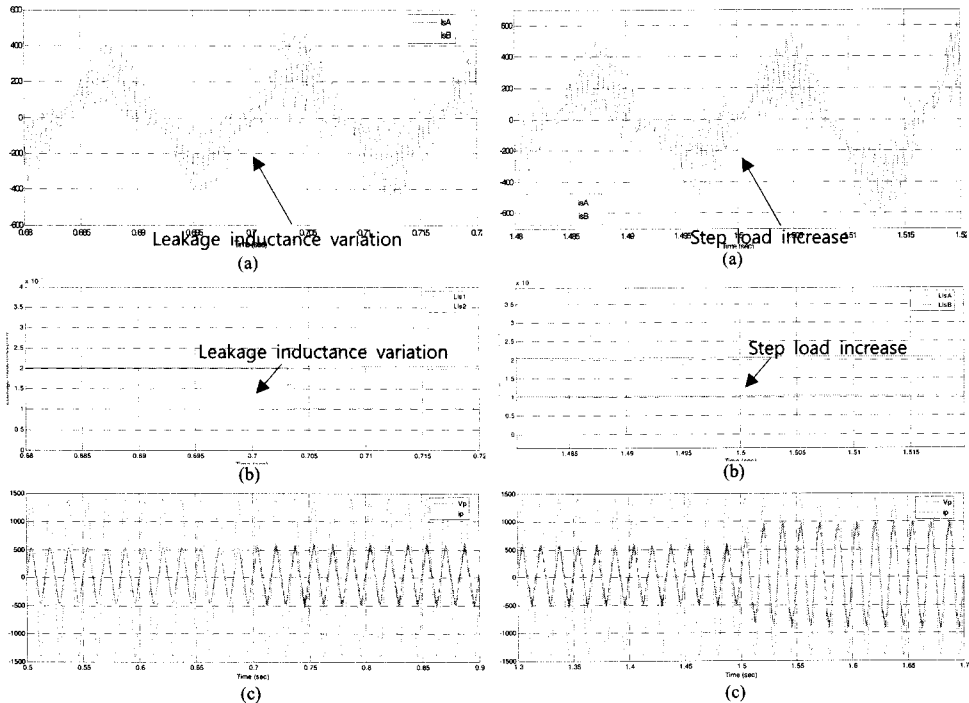


그림 4. 0.7초에 누설 인덕턴스 값의 변화에 따른 시뮬레이션 결과 파형

- (a) 컨버터 입력 전류 i_{sA} 와 i_{sB}
- (b) 승압용 인덕턴스 값의 추정치
- (c) 입력 전압과 입력 전류 파형

그림 5. 1.5초에 단계부하증가에 따른 시뮬레이션 결과 파형

- (a) 컨버터 입력 전류 i_{sA} 와 i_{sB}
- (b) 승압용 인덕턴스 값의 추정치
- (c) 입력 전압과 입력 전류 파형

5. 결론

본 논문은 승압용 인덕턴스의 값이 변압기 운전환경에 의해 변화될 때 승압용 인덕턴스의 추정 기법을 제안하였다. 승압용 인덕턴스의 값들은 환류 모드에서 입력 교류 전압을 검출하고 컨버터 입력 전류의 변화분을 추출하여 계산함으로써 추정되어진다.

제안한 기법을 사용한 승압용 인덕턴스의 값은 전향 제어기와 전류 제어기에 사용되어질 수 있다. 전향 제어기에서 각각의 컨버터 스위칭에 의해 발생하는 간섭현상은 추정된 승압용 인덕턴스에 의해 계산되어진 이득 값에 의해 정확하게 보상되어진다. 전류 제어기에서 추정된 승압용 인덕턴스는 전달 함수에 사용되어진다. 전달 함수가 추정된 승압용 인덕턴스에 의해 변화되어질 때, 우리는 PI 제어기를 재조정할 수 있다. 제안한 추정 기법은 향상된 제어기를 설계하고 입력 전류의 고조파성분을 감소시키며 THD를 감소시키는 이점을 가지고 있다.

본 논문은 제안된 기법의 우수한 성능을 MATLAB SIMULINK 시뮬레이션을 통해 증명하였다, 제안된 승압용 인덕턴스 추정기는 승압용 인덕턴스의 변화뿐만 아니라 갑작스런 부하 변화에도 훌륭한 성능을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Shen, J., Taufig, J. A., and Mansell, A. D. "Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters," *IEE proceedings on Electronic Power Applications*, Vol. 144, no. 2, pp.158-168, 1997
2. Hong-Je Ryoo, Jong-Soo Kim, Geun-Hie Rim, Yong-Ju Kim, Myung-Ho Woo, and Chung-Yeun Won "Unit power factor operation of parallel operated AC to DC PWM converter for high power traction application," in *PESC Record-IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 2, no 17-21, pp.631-636, June 2001
3. Taufig, J. A., Shen, J. "Frequency domain modeling of traction PWM converters," in *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, Vol. 7, no 13-16, pp.63-67, Sep. 1993
4. Midya, P. and Schlereth, F. H. "Dual switched mode power converter," *Industrial Electronics Society, IECON '89, 15th Annual Conference of IEEE*, Vol. 1, pp. 155-158, 6-10 Nov. 1989
5. Yeun-Chung Kim, Chung-Yeun Won, Lee Hun Kim, Jun Ho Kim and Woo Suk Lee, "Study on the four parallel operation of the single-phase PWM converter using the fuzzy-neural controller," *Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics-ISIE*, Vol. 1, pp. 492-496, 12-16 June 2001
6. Christopher K. Duffey et al, "Update of Harmonics Standard IEEE-519 : IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electronic Power System", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 25, Issue 6, pp.1025-1034, Nov.-Dec. 1989
7. Stihl, O. and Boon-Teck Ooi, "A single-phase controlled-current PWM rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no 4, pp. 453-459, Oct 1988