

입력 필터를 갖는 풀브리지 기반의 ISOP DC-DC 컨버터의 전력분담 제어

정철우, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Power Sharing Control of Full-Bridge-Based ISOP DC-DC Converters with Input Filters

Choul-Woo Jung, Dong-Choon Lee
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문은 입력 필터를 갖는 풀브리지 기반의 ISOP 모듈러 DC-DC 컨버터에서 각 모듈 간에 동일전력 분담을 위한 디커플링 제어기법을 제안한다. 이 제어기법은 PSIM 시뮬레이션을 통해 타당성이 검증되었다.

1. 서론

최근 교통수단의 급속한 전기화와 신재생 에너지의 수요 증가로 인해 더 높은 전력 용량과 더 높은 전압 및 전류를 처리할 수 있는 DC-DC 전력변환 시스템이 점점 더 요구되고 있다. ISOP(input-series output-parallel)시스템의 경우 각 모듈의 단자가 입력이 직렬, 출력이 병렬로 구성되어 있어 입력전압이 높은 응용 분야에 적합하다.

ISOP 구조에서는 모듈 간에 동일한 전력을 분담하기 위해서 IVS(input voltage sharing) 제어가 필요하며, 또 출력전압을 제어하기 위해 OVR(output voltage regulation)이 요구된다. 이 두 제어루프 간의 독립적인 제어를 위해 디커플링 제어가 제안된 바 있다. 그러나 입력필터를 갖는 모듈러 컨버터의 경우에는 기존의 기법으로는 독립적인 제어루프를 구성할 수 없다^[1].

본 논문에서는 3개의 풀브리지 모듈로 구성된 ISOP 모듈러 컨버터에 대한 모델을 유도하고, 기존 디커플링 제어에 대한 한계점을 해결할 수 있는 새로운 제어기법을 제안한다. PSIM 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기법의 타당성을 검증한다.

2. 입력필터를 갖는 ISOP 시스템의 모델링 및 제어

2.1 소신호 모델링 및 기존 기법의 한계점

그림 1은 입력 필터를 포함한 풀브리지 컨버터로 이루어진 ISOP 시스템에 대한 소신호 회로모델을 보인다. 각 모듈의 입력전압 및 공통출력전압에 대한 소신호 모델식은 다음과 같다^[1].

$$\hat{v}_o = G_{vdf} \frac{(\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \hat{d}_3)}{3} \quad (1)$$

$$\hat{v}_{ij} = G_1 \frac{\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \hat{d}_3}{3} - G_2 \hat{d}_j \quad (2)$$

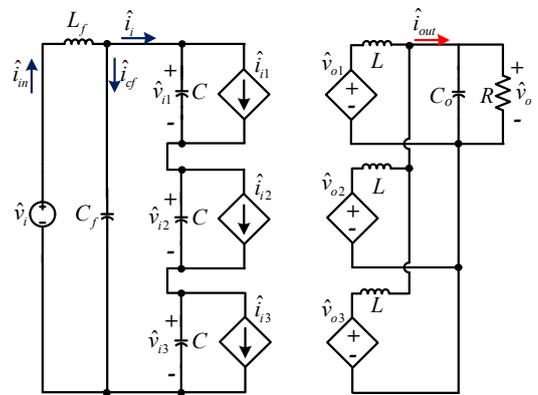


그림 1 입력 필터를 포함한 풀브리지 기반의 ISOP 시스템

$$G_1 = \frac{(DKG_{vdf} + G_{idf}Z_L)Z_c}{D^2a^2Z_c + Z_L} \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{a(V_iDRa + V_oZ_L)Z_c}{NR(D^2a^2Z_c + Z_L)} \quad (4)$$

$$G_{vdf} = -\frac{Z_o(DV_oZ_cZ_f a - NR V_i Z_c - R V_i Z_f) a}{(D^2a^2Z_f Z_c + N^2Z_c Z_o + NZ_L Z_c + NZ_f Z_o + Z_L Z_f) R} \quad (5)$$

$$G_{idf} = \frac{Z_c a (V_i D R a + N V_o Z_o + V_o Z_L)}{R (D^2 Z_f Z_c a^2 + N^2 Z_c Z_o + N Z_L Z_c + N Z_f Z_o + Z_L Z_f)} \quad (6)$$

여기서, $\hat{d}_1, \hat{d}_2, \hat{d}_3$ 는 각 모듈의 위상천이 비율, j 는 각 모듈의 번호를 나타낸다. 또, Z_f, Z_L, Z_c, Z_o 는 각각 입력필터, 출력인덕터, 출력커패시터, 부하의 임피던스이며, V_i 는 전체입력전압, D 는 동작점에서의 위상천이비율, a 는 변압기의 턴수비, N 은 모듈의 수를 나타낸다.

식 (1)과 (2)로부터 IVS와 OVR을 구현하기 위한 시스템은 다음과 같은 행렬 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{i1} \\ \hat{v}_{i2} \\ \hat{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_1}{3} - G_2 & \frac{G_1}{3} & \frac{G_1}{3} \\ \frac{G_1}{3} & \frac{G_1}{3} - G_2 & \frac{G_1}{3} \\ G_{vdf} & G_{vdf} & G_{vdf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

입력 필터의 포함은 입력전압 전달함수에 영향을 미치므로 기존의 디커플링 제어기법^{[1],[2]}을 적용할 수가 없다.

2.2 제안하는 제어 기법

따라서 본 절에서는 IVS를 구현하기 위해 새로운 제어 변수를 도입한다. 전체 입력측 전압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_i &= \sum_1^3 \hat{v}_{ij} \\ &= G_1(\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \hat{d}_3) - G_2(\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \hat{d}_3) \end{aligned} \quad (8)$$

모듈의 입력전압을 동일하게 제어하기 위한 각 모듈의 입력전압의 지령치는 전체 입력전압의 1/3로 설정한다.

$$\hat{v}_{ij}^* = \frac{1}{3} G_1(\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \hat{d}_3) - \frac{1}{3} G_2(\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \hat{d}_3) \quad (9)$$

따라서, 입력전압 제어기 오차는 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{e}_{rr1} = \hat{v}_{i1} - \hat{v}_{i1}^* = \frac{G_2}{3}(2\hat{d}_1 - \hat{d}_2 - \hat{d}_3) \quad (10)$$

기존 제어변수인 식 (2)의 v_{ij} 와 비교하면 (10)은 단일 전달함수 관계로 표시된다. 따라서 각 모듈 입력전압 제어의 오차를 제어변수로 선정하면 입력 필터를 포함한 ISOP에 대한 시스템 행렬이 아래와 같이 단순하게 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_{rr1} \\ \hat{e}_{rr2} \\ \hat{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G_{vi} & -G_{vi} & -G_{vi} \\ -G_{vi} & 2G_{vi} & -G_{vi} \\ G_{vdf} & G_{vdf} & G_{vdf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \end{bmatrix} = G_F(s) \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $G_{vi} = G_2/3$ 이다. 단순화된 시스템행렬 (11)에 디커플링 제어기법^{[2],[3]}을 적용하면 다음과 같이 대각행렬과 제어입력행렬로 분리되어 각 제어루프 간의 독립적인 제어가 가능해진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_{rr1} \\ \hat{e}_{rr2} \\ \hat{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3G_{vi} & 0 & 0 \\ 0 & 3G_{vi} & 0 \\ 0 & 0 & 3G_{vdf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \\ \hat{\delta}_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \\ \hat{\delta}_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2, \hat{\delta}_3$ 은 세 제어루프에서 제어기들의 출력이며, 이들은 식(13)으로부터 세 개의 폴브리지의 제어입력 $\hat{d}_1, \hat{d}_2, \hat{d}_3$ 을 합성해 낸다. 그림 2는 제안하는 제어기법의 블록도이다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 제어기법을 검증하기 위해 입력 필터를 포함한 3개의 폴브리지 모듈로 구성된 6-kW ISOP 시스템을 PSIM을 이용하여 시뮬레이션하였다. 각 모듈 간의 동일한 전력분담 성능을 확인하기 위해 각 변압기의 누설인덕턴스 및 턴수비 간에 약 10%의 파라미터 불일치를 적용하였다. 그림 3은 부하변동에 따른 IVS와 OVR의 성능을 나타낸다. 각 모듈의 파라미터가 불일치할 경우에도 동일한 전력분담이 이루어짐을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 입력 필터를 포함한 ISOP 모듈러 DC-DC 컨버터 시스템의 전력분담을 위한 디커플링 제어기법을 제안하였다. 이는 입력전압 제어기의 오차를 제어변수로 설정함으로써 기

표 1 시스템 파라미터

전체입력전압	750 [V]	L_f	3 [mH]
출력전압	350 [V]	C_f	330 [μ F]
부하저항	20.4 [Ω]	스위칭 주파수	10 [kHz]
변압기 권수비	1 : 2	출력 커패시터	1000 [μ F]
모듈 입력커패시터	1000 [μ F]	모듈 출력인덕터	470 [μ H]

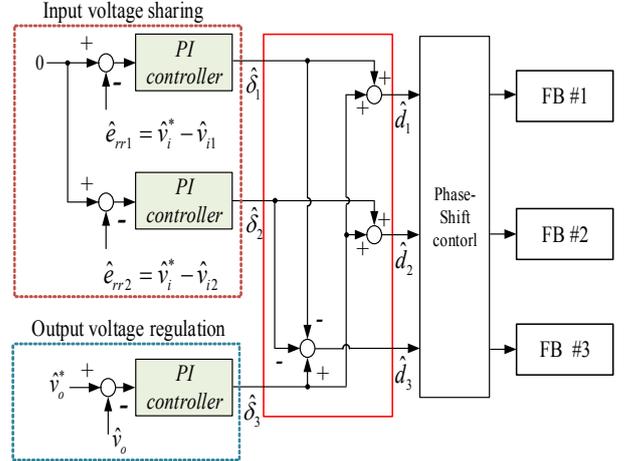


그림 2 제안하는 디커플링 제어기법의 블록도

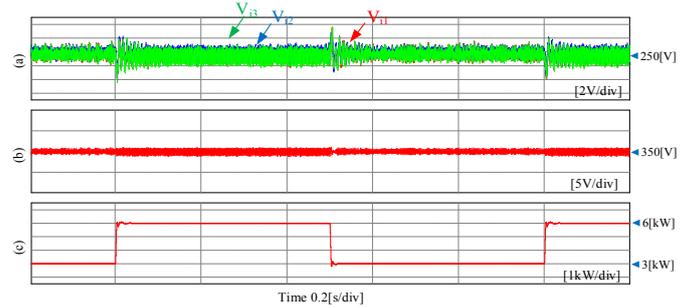


그림 3. 부하 변동에 따른 IVS와 OVR의 제어 성능
(a) 각 모듈의 입력전압, (b) 출력전압, (c) 부하전력

존 제어기법의 한계점을 해결할 수 있었다. 전력분담 제어성능은 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2A2A05069629).

참고 문헌

- [1] P. Zumel E. Oña C. Fernandez M Sanz A. Lazaro, and A. Barrado, "Analysis and modeling of a modular ISOP full bridge based converter with input filter," in proc. of IEEE APEC, pp. 2545-2552, 2016.
- [2] X. Ruan L. Cheng, and T. Zhang, "Control strategy for input-series output-paralleled converter," in proc. of IEEE PESC, pp. 238-245, 2006.
- [3] C.-W. Jung and D.-C. Lee, "Decoupling control of input-paralleled system with dual active bridge converters," in proc. of IEEE ISEE, 2019.