

還流電流を利用した DAB マトリックスコンバータの動作領域の明確化

◎桐 嘉伸, 宅間 春介, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1.はじめに

近年, 急速充電器の大容量化が要求されている。充電用回路の小型化のために, マトリックスコンバータ(MC)を用いた絶縁型 AC-DC コンバータが提案されている(1)-(2)。文献[2]では, デュアルアクティブブリッジ (DAB) 形 MC においてゼロ電圧期間の循環電流を調節することで全領域ゼロ電圧スイッチング(ZVS)を達成している。しかし, 動作可能領域や電流連続モード(CCM)と電流不連続モード(DCM)の境界条件は未検討である。

本論文では検討回路において, 系統一周期中に DCM と CCM が混在する領域と DCM で駆動する領域の境界を明らかにし, シミュレーションにて確認したので報告する。

2.理論検討

図 1 に三相単相 MC を用いた絶縁型 AC-DC 変換回路を示す。MC, 絶縁トランス, 整流器で構成され, 整流器電圧 v_{rec} と MC の出力電圧 v_{mc} の位相を調整することで伝送電力を決定する。

図 2(a)に空間ベクトル変調の原理図を示す。三相電流指令を $\alpha\beta$ 変換して得られた \vec{I}_{in}^* は, 各スイッチングパターンにおける電流ベクトル成分に分解でき, それぞれの電流成分は $|i_{mid}|$, $|i_{min}|$ と大きさが等しくなる。

図 2(b)に MC と整流器の電圧とトランスの電流波形を示す。一次側 v_{max} -二次側が 0V にクランプされている期間を d_a , 一次側 v_{max} -二次側 NV_{dc} の期間を d_1 , 一次側 v_{mid} -二次側 NV_{dc} の期間を d_2 , 一次側 0V-二次側が NV_{dc} の期間を d_b , ゼロ電圧期間 d_0 と定義する。また, d_a と d_1 の比率 a を (1)式で定義する。

$$a = \frac{d_a}{d_1} \dots\dots\dots (1)$$

トランス電流の d_a+d_1 期間と d_2 期間における電流の周期平均値が, それぞれ i_{mid} と i_{min} に等しくなるようデューティを決定する(2)。そのほか, 各デューティは文献[2]にあり, 電流ベクトル成分とデューティとトランスの瞬時電流値の関係式から導出できる。

まず初めに CCM と DCM の境界条件について検討する。 $d_0 = 0$ の時 CCM, $d_0 > 0$ の時 DCM と定義する。 d_a , d_1 , d_2 , d_b , d_0 の総和は 1 であり, d_0 以外のデューティの和が最大となると d_0 は最小となる。 $i_{mid} = i_{min}$ となる時 d_0 が最小となるため CCM と DCM の境界条件は,

$$\therefore v_{max} = v_{mid} = \sqrt{3/2}V_{ac} \quad \therefore i_{mid} = i_{min}$$

となる。デューティの総和を $d_0=0$ の条件で解くと, 臨界条件で動作する伝送電力が(2)式で得られる。

$$P = \frac{(NV_{dc})^2}{2Lf_{sw}} \frac{3V_{ac}^2(a+1)^2 - \sqrt{6}V_{ac}NV_{dc}}{3V_{ac}^2(a+1)^2 + \sqrt{6}V_{ac}aNV_{dc} + 2(NV_{dc})^2} \dots (2)$$

ここで, d_2/d_1 の比が実数解となるよう計算すると, 比率 a の最小値は(3)式で表される。

$$a_{min} \geq \frac{-r_1 \pm \sqrt{r_1^2 - 4r_2}}{2} - 1 \dots\dots\dots (3)$$

ここで, r_1, r_2 はそれぞれ(4), (5)式で与えられる。

$$r_1 = -\frac{2NV_{dc}}{\sqrt{6}V_{ac} - NV_{dc}} \dots (4) \quad r_2 = -\frac{\sqrt{6}V_{ac} - 4NV_{dc}}{6V_{ac} - \sqrt{6}NV_{dc}} \frac{NV_{dc}}{V_{ac}} \dots (5)$$

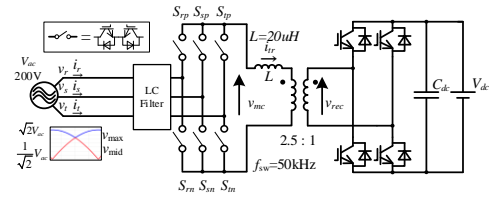


Fig. 1. Schematic and simulation parameters.

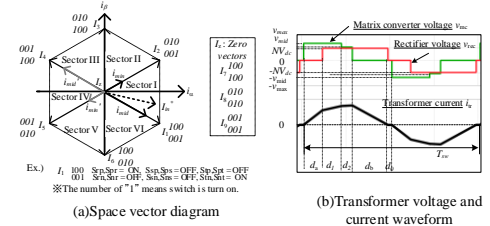
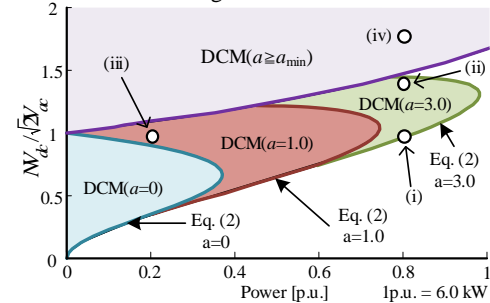


Fig. 2. Current command value generation and transformer voltage and current waveform.



(a) Boundary condition between DCM and DCM-CCM mixed area

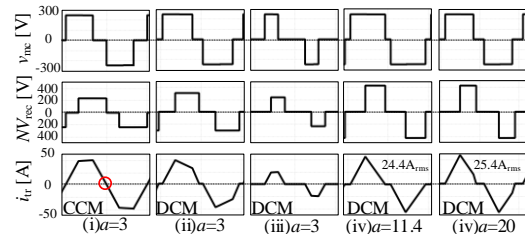


Fig. 3. Verification of theoretical examination.

3.シミュレーション結果

図 3(a)に DCM 領域と DCM-CCM 混在領域の境界線を示す。各色の範囲はそれぞれの a の場合の DCM 領域, 実線は(2)式により得た臨界条件の動作点である。

図 3(b)に図 3(a)の(i)から(iv)におけるシミュレーション動作波形を示す。(i)では CCM 動作, (ii)-(iii)では DCM 動作を確認した。また, (iv)では, (3)式より得られる $a_{min} \geq 11.4$ を満たした $a=11.4, 20$ における DCM 動作を確認した。以上より, 臨界条件における伝送電力を表した(2)式の妥当性確認した。さらに, $a=11.4, 20$ の各トランス電流実効値は $24.4A_{rms}$, $25.4A_{rms}$ であり, 動作範囲を満たす最小の a を用いることで電流実効値低減が期待できる。

参考文献

1. D. Varajao, etc.: IEEE Trans. IE, Vol. 65, No. 4, APRIL (2018)
2. 宅間, 他 : SPC 鳥取, No. SPC-20-109 pp.13-18 (2020)