

トランスを共有化したマルチポートアクティブブリッジコンバータの電力分配に関する一考察

◎古川 啓太, 日下 佳祐, 宅間 春介, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

磁気結合を用いた非接触給電の研究が盛んにおこなわれている。その1つとして、DAB (Dual Active Bridge) コンバータを用いた回路方式が提案されているが、無効電流が大きく⁽¹⁾、スイッチング素子の導通損失と銅損の増加が問題となっている。

本論文では、導通損失低減を目的として DAB コンバータを並列接続し、送電側と受電側のコアをそれぞれ共有化する方法を提案する。また送受電コアについて、同相で駆動する巻線間の磁気結合と入力力率の関係について考察し、無効電流の低減手法を検討する。

2. 検証回路における結合係数と力率の関係

DAB コンバータではフルブリッジインバータによって各巻線に矩形波を入力し、位相シフト制御によって電力伝送をおこなう。本論文では簡単化のため基本波成分のみ考える。

図1に検証回路を示す。コイルの1次側と2次側に巻線を2本ずつ巻いた4巻線トランスについて、1次側巻線1と2を非接触給電の送電コイル、2次側巻線3と4を受電コイルとする。各巻線の入力電流と印加電圧の関係は、4次のインダクタンス行列より(1)式で表現される。

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

L_{ii} は巻線*i*の自己インダクタンス、 $L_{ij}(i \neq j)$ は巻線*i*と巻線*j*間の相互インダクタンスである。行列成分について、 $L_{ij}=L_{ji}$ の関係が成立する。(1)式を多巻線トランスの等価回路モデル⁽²⁾に変換して回路解析を行うことで、各巻線の入力電力および入力力率が導出できる。

自己インダクタンス L_{DAB} が等しく、送電巻線と受電巻線間の結合係数 k_M , k_{DAB} および同相で駆動する巻線の結合係数 k_c が図1で示されるトランスの場合、伝送電力 P と送電側から見た多巻線トランスへの入力力率 $\cos\theta$ の理論式はそれぞれ(2)式と(3)式となる。

$$P = \frac{2(k_M + k_{DAB})V_p V_s \sin \delta}{2\pi f L_{DAB} \left\{ (1+k_c)^2 - (k_M + k_{DAB})^2 \right\}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\cos\theta = \frac{V_s \sin \delta}{\sqrt{(V_s \sin \delta)^2 + \left(\frac{k_c + 1}{k_M + k_{DAB}} V_p - V_s \cos \delta \right)^2}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで送電側電圧を V_p 、受電側電圧を V_s とし、 V_p に対する V_s の位相差を δ とする。(3)式より、結合係数 k_M , k_{DAB} が一定の時 k_c が小さいほど力率が改善することがわかる。

図2に検証回路を2巻線トランスのT形等価回路で表現した場合を示す。 k_c による漏れインダクタンスは、漏れインダクタンス成分に直列な、大きさ $L_{DAB}(1-k_c)/2$ の負性インダクタタであらわされる。これは、入出力側から見た合成自己インダクタンスの L_{DAB} に対する減少分に相当し、漏れインダクタンスを減少させる方向に作用する。その結果検証回路の送電巻線と受電巻線間の等価的な磁気結合が大きくなり、力率が改善すると考えられる。

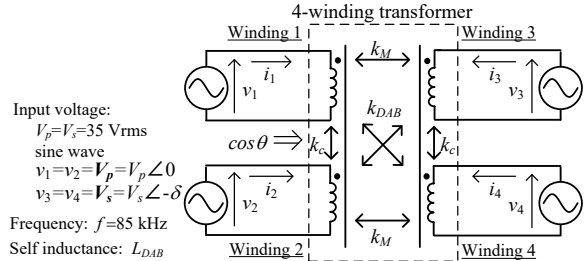


Fig. 1. Test circuit using 4-winding transformer.

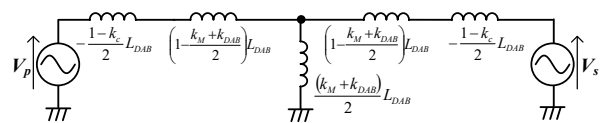


Fig. 2. Equivalent circuit of figure 1 ($v_1=v_2=V_p$, $v_3=v_4=V_s$).

Table 1. Parameters of prototype 4-winding transformers.

Trans. No.	Self inductance L_{DAB} μ H	Coupling coefficient		
		k_c	k_M	k_{DAB}
1	26.2	0.771	0.233	0.200
2	27.1	0.483	0.232	0.201
3	27.0	0.236	0.217	0.199

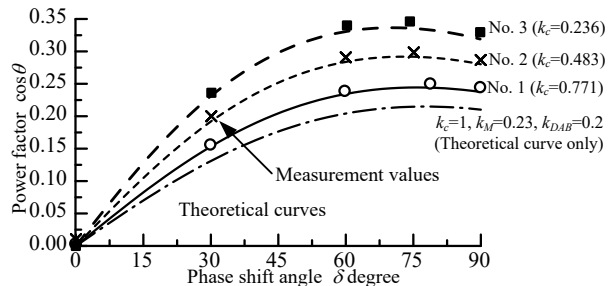


Fig. 3. Input power factor characteristics against coupling coefficient k_c . X-axis is phase shift angle of V_s .

3. 実機検証

結合係数 k_c の減少に伴う力率の改善効果を確認するため、図1の検証回路を用いて実機検証をおこなう。

表1に実験で使用した4巻線トランスのパラメータを示す。非接触給電システムに適用するために、 k_{DAB} , k_M は低い値を想定し0.2付近とした。

図3に、各トランスの位相シフト量に対する入力力率特性を示す。曲線は理論特性、プロット点は測定した力率である。比較のために $k_c=1$ における力率の理論特性も示している。 k_c が小さいほど力率は改善し、伝送電力が最大となる $\delta=90^\circ$ において、 $k_c=0.236$ では $k_c=1$ のときより力率が57%改善する。したがって、 k_c を小さくすることで力率改善の達成、すなわち無効電流を低減可能であることが確認できる。この結果、銅損や導通損失の低減、スイッチング素子の電流定格削減などが可能になる。

今後は検討結果をマルチポートの DAB コンバータの実験にて検証する予定である。

参考文献

- 日下, 伊東: 電学論 D, Vol.136, No.2, pp.189-197 (2015)
- 稲垣: 電学論 B, Vol.123, No.6, pp.742-748 (2003)