非共振形 DC-DC コンバータ用高周波昇圧変圧器の開発

正員 恒岡まさき (日本原子力研究所)

正員 浅香敏夫 (東京電子)

非会員 中山伸好 (東京電子)

非会員 飯山俊光 (東京電子)

Development of high frequency step-up transformer for DC-DC converter

Masaki Tsuneoka, Member, (JAERI), Toshio Asaka, Member, (IDX)

Nobuyoshi Nakayama, Non-member, (IDX), Toshimitsu Iiyama, Non-member, (IDX)

High frequency step-up transformers for non-resonant DC-DC converter have been developed. The rated parameters of the transformers are 5kVA of capacity, from 650V, 7.7A of primary to 16.7kV, 0.3A of secondary with squared wave at 5kHz of frequency and the withstand voltage of the transformer is 100kV. Avoiding parasitic oscillation, distributed windings are applied to get low capacitance of the windings and reduce the capacity into about one hundredth. This paper also reports the test result of frequency characteristics of the step-up ratio and phase.

キーワード： 非共振形 DC-DC コンバータ, 高周波昇圧変圧器, 寄生共振, 分割巻

1. まえがき

非共振形 DC-DC コンバータを用いた低圧-特高変換直流電源は特高側の蓄積エネルギーを最小化でき、かつ効率が良いため高速遮断性能を持つ大容量電源に適している。筆者等は核融合用電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) のジャイロトロン加速電源に用いている出力 100kV ± 0.5%, 300mA の電源へ非共振形 DC-DC コンバータ方式を採用した^[1]。さらに、本方式で MW 級の特高直流電源の開発を目指している。

この方式の課題点には昇圧に用いる変圧器へ低損失、高耐電圧性能に加え寄生共振対策がある。低損失化には鉄心材の選択、高耐電圧化には巻線間のギャップで対策が可能である。しかし、寄生共振は漏れインダクタンスと 2 次巻線容量とで形成されるもので、共振周波数とキャリア周波数との重合を避けるためには低漏れインダクタンスと低巻線容量となる昇圧変圧器を必要とすることが判った^[1]。

本論文では新たに 5 kVA の容量、矩形波で 5 kHz のキャリア周波数で寄生共振周波数 50kHz 以上、変圧比 26.7 および 100kV の耐電圧の性能の高周波昇圧変圧器を開発したので報告する。

2. 変圧器の設計と実測値

MW 級の電源を目指した場合を想定すれば変圧器の単機で数百 kVA の容量を想定する必要がある、これを見込んで変圧器の鉄心材は 6.5% 珪素鋼板を使用した変圧器 1, 2 の 2 台に採用し、参考のためファインメットのものを

図 1 低容量巻線による高周波昇圧変圧器

Fig.1 High frequency step-up transformer with low capacitance winding

表1 試作変圧器のパラメータ表
Table 1 parameters of the transformers

試験器	コア材	磁束密度 [T]	損失 (設計値) [w]	1次巻数 [turns]	2次巻数 [turns]			1次側漏れイ ンダクタンス [μH]	巻線 容量 [pF]
					一層巻数	層数	分割数		
変圧器 1	6.5%珪素鋼	0.2	150	60	20	6	13	265	66.5
変圧器 2	同上	0.28	200	80 (40×2巻)	20	6	13	150	95
変圧器 3	ファインメット (FT-3M)	0.48	40	21	7	4	20	15	59.4

圧器3として1台に採用した。1次電圧・電流は650V, 7.7Aで2次電圧・電流は16.7kV, 0.3Aの矩形波5kHzの動作周波数である。1次-2次間の耐電圧100kVのものとするため油入変圧器とし、耐圧試験電圧も130kVで10分間印加した。

変圧器の漏れインダクタンス L_i は

$$L_i = \mu k N^2 m [\delta 0 + (\delta 1 + \delta 2) / 3] / h \quad (1)$$

$$k = 1 - (\delta 0 + \delta 1 + \delta 2) / 3 \quad (2)$$

ここで、 L_i ：漏れインダクタンス（1次換算値）、 k ：ログウスキーの補正係数、 N ：1次巻線の巻数、 m ：全巻線の平均長、 $\delta 0$ ：1次2次巻線間のギャップ、 $\delta 1, \delta 2$ ：それぞれ1次巻線、2次巻線の厚さ、 h ：巻線長である。特に巻線長が長く、巻線厚が小さいパラメータで製作することにより漏れインダクタンスは15～260 μ H程度となった。

当初、2次巻線の静電容量は高野等の評価式^[2]を用いて一般のレイヤー巻きの場合を評価すれば、この静電容量は4000～5700pFになる。この容量での寄生共振周波数は4.8～20kHzとなり、動作周波数と重なりコンバータ運転に支障を来す。そこで、筆者等は図1に示すように2次巻線を多数のブロックに分割させ、巻線に蓄積する静電エネルギーを小さくする方法を用いた。変圧器1, 2で13に分割し、変圧器3で20に分割して製作した。これらの定格負荷時の周波数応答特性を図2に示す。これらの結果から共振周波数はキャリア周波数の5kHzを1桁超える50～200kHzとなり、多数ブロック化した効果を確認した。また、この共振点より静電容量を求めた結果を表1に示すように、60～95pFとなり、巻線静電容量の削減も実現している。

図2 定格負荷時の昇圧比と位相差の周波数応答特性

Fig.2 Frequency response of the step-up ratio and phase under the rated operation

3. むすび

非共振形 DC-DC コンバータを採用した出力 100kV±0.5%, 300mA の電源のための 5KVA、650V/16.7kV、耐電圧 100 k V の高周波昇圧変圧器の開発を行った。特に寄生共振に対する対策として、低漏れインダクタンスで低静電容量の変圧器とするために、巻線長が長く巻線厚の薄い構造とすることで低インダクタンス化を図り、さらに2次巻線を多分割化して、およそ百分の1に低容量化した。これにより矩形波 5kHz の動作周波数と寄生共振周波数が重なるこのない高周波変圧器を得た。

(平成 11 年 5 月 25 日受付, 平成 11 年 6 月 23 日再受付)

文 献

- [1] 恒岡、藤田、今井、浅香、飯山「CPDジェイロトロン用特別高圧高安定化電源の開発」、電学論D, 115, 539～544, 1995—5
- [2] 高野、畠山、中岡「トランス共振形大容量 DC-DC コンバータの医用X線高電圧発生装置への応用」電学論D, 117, 133～141, 1997—2