

真空大電力サーキュレーターの開発

DEVELOPMENT OF HIGH POWER VACUUM CIRCULATOR

福住直貴^{#, A)}, 三浦厚^{A)}, 鶴岡茂嗣^{B)}, 篠原己抜^{A)}, 谷内努^{C)}, 鈴木伸介^{C)}, 花木博文^{C)}
Naoki Fukuzumi^{#, A)}, Atsushi Miura^{A)}, Shigetsugu Tsuruoka^{B)}, Kibatsu Shinohara^{A)},
Tsutomu Taniuchi^{C)}, Shinsuke Suzuki^{C)}, Hirofumi Hanaki^{C)},
^{A)} Nihonkoshuha.co.ltd
^{B)} N·K·S

^{C)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Abstract

We have developed high power vacuum circulator for useful exchanging from pressure type (SF₆) waveguide to vacuum type component. We measured tune shift of ferrite occurred by high magnetic field which is excited by input RF high power. This tune shift limit handling power at range of center value ± 10 MW in case of Y-junction type circulator. In order to attach more high power circulator, we have developed 4 port type vacuum circulator. We measured amount of phase shift depended on input RF power in case of vacuum phase shifter. This result shows us maximum handling power of 50 MW for 4 port type circulator.

1. はじめに

SF₆ 等を使用した加圧型の立体回路はコストが安価なメリットがある反面、放電後のメンテナンスや位相の安定度の問題があり、真空導波管への切り替えを検討する必要がある。しかしながら真空仕様のサーキュレーターは存在せず、これが切り替えの障害となることが多い。著者らはピーク電力 10 MW の Y 型真空大電力サーキュレーターの開発、実用化に成功した^{[1][2][3][4]}。大電力真空サーキュレーターの実験結果から、大電力投入時のフェライトは高周波磁場により共振特性の遷移が起こり使用電力に制限が起こることがわかった(中心値 ± 10 MW)。

そこでよりピーク電力の高いサーキュレーターを実現するために、移相型の 4 ポートサーキュレーターの可能性を本稿で検討した。真空フェライト移相器もサーキュレーターと同様共振特性の遷移が考えられる。移相器としての磁場動作点はサーキュレーターよりかなり高いので電力依存性は低いと考えられる。しかしながらハイブリッド合成器による合成では位相許容量は狭い。そこでハイブリッド合成器の許容位相量の計算を行い、その後真空フェライト移相器の大電力試験を行ったのでその結果を報告する。

2. 4 ポートサーキュレーターにおける 3dB ハイブリッド合成器の入力波位相エラーによる方向性の悪化

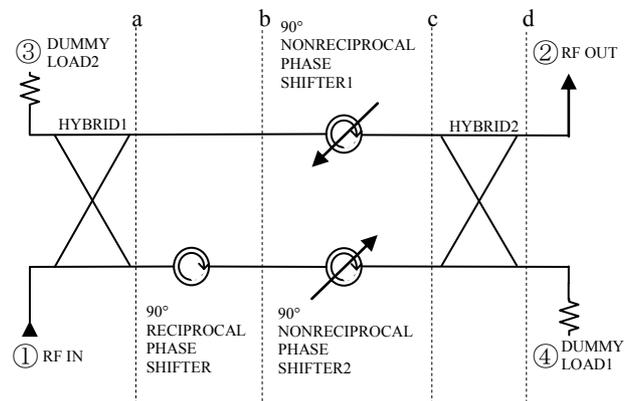


Figure 1: Diagram of typical 4 port type circulator.

Figure_1 に 4 ポートサーキュレーターの一般的な構成を示す。このとき上側の非可逆フェライト移相器を通る波は、右へ進むとき位相が $+\pi/2$ 進み、左に進むとき位相は変化しない。また下側の非可逆フェライト移相器を通る波は右へ進むとき位相は変化せず、左へ進むとき位相が $+\pi/2$ 進む。可逆移相器を通る波は左右共に位相が $+\pi/2$ 進む。①から入力された波は 3dB ハイブリッドにより波 A、波 B に分配される。a 点において、波 A の電圧は $1/\sqrt{2}e^{+j\pi/2}$ となり、波 B は $1/\sqrt{2}$ となる。可逆移相器を通過後の b 点において波 A は $1/\sqrt{2}e^{+j\pi/2}$ 、波 B は $1/\sqrt{2}e^{+j\pi/2}$ となる。それぞれの波が非可逆フェライト移相器を通過後の c 点において波 A は $1/\sqrt{2}e^{+j\pi}$ 、波 B は $1/\sqrt{2}e^{+j\pi/2}$ となる。こ

[#] Nao_fukuzumi@nikoha.co.jp

これらの波が 3dB ハイブリッド通過後の d 点において、端子②は $1/2e^{+j\pi/2}$ と $1/2e^{+j\pi}$ になり同位相となるので②より出力される。また d 点において端子④は $1/2e^{+j\pi/2}$ と $1/2e^{+j\pi}$ になり、逆位相で打ち消し合うので④からは出力されない。したがって①に入力された波は②に出力され、③および④からは出力されない。同様に経路を考えると、①→②、②→③、③→④、④→①の4つの経路が構成される。

このとき非可逆フェライト移相器の位相変化量 $\pi/2$ に対してエラーがある場合、位相量エラーがサーキュレーターの方向性の悪化として表れる。そこでこの許容エラーの計算を行う。

3dB ハイブリッドの VSWR は 1.0 とし、電圧結合係数を $1/\sqrt{2}$ とする。また、非可逆フェライト移相器の位相変化量を $\pi/2+\Delta\theta$ とする。

$\Delta\theta$ がある場合②からの入力の一部が①に出力される。このときの②からの入力波 $Ve^{-j\beta Z}$ (振幅 V、伝搬定数 β)は、3dB ハイブリッドにより分配され、非可逆フェライト移相器、可逆移相器を通過後、再度3dB ハイブリッドにより結合される。入力側①に表れる透過波は(1)式で表わされる。

$$\begin{aligned} Ve^{-j\beta Z} \frac{1}{2} \left(e^{+j\left(\frac{3\pi}{2}+\Delta\theta\right)} + e^{+j\frac{\pi}{2}} \right) \\ = Ve^{-j\beta Z} \frac{1}{2} (-je^{+j\Delta\theta} + j) \\ = Ve^{-j\beta Z} \frac{1}{2} j(1 - e^{+j\Delta\theta}) \end{aligned} \quad (1)$$

電圧透過係数 T は(1)式を入力電圧で割ったものなので(2)式になる。

$$T = e^{-j2\beta Z} \frac{1}{2} j(1 - e^{+j\Delta\theta}) \quad (2)$$

(2)式を簡易的に $Z=0$ とし初項を1とすると(3)式が成立する。

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} j(1 - e^{+j\Delta\theta}) \\ &= \frac{1}{2} j\{(1 - \cos\Delta\theta) - j\sin\Delta\theta\} \\ &= \frac{\sin\Delta\theta}{2} + j\frac{(1 - \cos\Delta\theta)}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式を振幅と位相に書き直すと(4)式が成立する。

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{\left(\frac{\sin\Delta\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{(1 - \cos\Delta\theta)}{2}\right)^2} e^{j\phi} \\ &= \sqrt{\frac{\sin^2\Delta\theta}{4} + \frac{1 - 2\cos\Delta\theta + \cos^2\Delta\theta}{4}} e^{j\phi} \\ &= \sqrt{\frac{1 - 2\cos\Delta\theta + 1}{4}} e^{j\phi} \\ &= \sqrt{\frac{2 - 2\cos\Delta\theta}{4}} e^{j\phi} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\theta)} e^{j\phi} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\tan\phi$ は(5)式である。

$$\tan\phi = \frac{\sin\Delta\theta}{1 - \cos\Delta\theta} \quad (5)$$

方向性 20dB の仕様であれば $\Delta\theta = \pm 11.5$ 度となる。

3. 真空フェライト移相器大電力試験

3.1 真空フェライト移相器大電力試験セットアップ

真空フェライト移相器大電力試験のセットアップを Figure2 に示す。

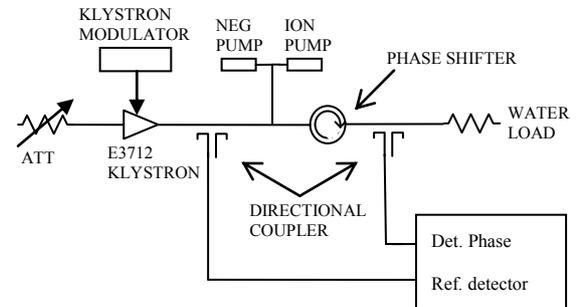


Figure 2: Set up of high power test for vacuum phase shifter.

また本試験で使用した真空フェライト移相器を Photo_1 に示す。Table_1 には真空フェライト移相器の仕様を示す。この真空フェライト移相器は真空サーキュレーター開発時に製作した単向管試作機を磁場調整して使用した。この真空フェライト移相器の位相変化量は 6.4 度である。サーキュレーター用移相器として必要な 90 度に対して、 $6.4/90=0.071$ 倍なので許容位相量は $\pm 11.5 \times 0.071 = \pm 0.82$ 度となる。



Photo 1: External view of vacuum phase shifter.

Table 1: Specifications of Vacuum Phase Shifter

At 2856MHz	Vacuum phase shifter
Operation frequency	2856MHz
Phase shift	6.4degree
Peak power	50MW
Pulse width	2.5 μ sec
Repetition rate	10pps
Isolation	>20dB
Insertion loss	<0.2dB
Input VSWR	<1.1
Loss of Ferrite	0.25W

大電力試験時の位相検出には、位相検出器(日本高周波製)を使用した。この位相検出器は検出入力信号のダイナミックレンジは広いが基準入力信号のダイナミックレンジは広くはない。クライストロン前段から基準信号を取ると基準信号レベルは安定するが、クライストロンや導波管の位相変化量も含めて測定されてしまう。このため基準入力信号の推奨範囲を超えるが移相器入力側方向性結合器の出力を基準信号に、移相器出力側方向性結合器の出力を検出信号に接続し測定した。接続にはセミリジッドケーブルを使用しなるべく動かさない様にした。

この方法で順方向および逆方向で電力を変化させたときの位相測定を行った。順方向と逆方向ではフランジのオスメスが逆になるため、インターピースを挿入する必要がある測定位相の絶対値は意味がなくなる。このため同じ電力で逆方向の位相量から順方向の位相量の差を取り、その変化を見た。この方法で位相検出器のエラーも補正される。

3.2 真空フェライト移相器大電力試験結果

本試験において真空フェライト移相器は順方向および逆方向でそれぞれ向きを逆にし、エージングを行い測定した。順方向のエージングには 10 時間で終了し、このときの真空度は $5.1 \times 10^{-7} Pa$ であった。また逆方向のエージングは 44.5 時間で終了し、このときの真空度は $1.2 \times 10^{-6} Pa$ であった。Figure_3 に真空フェライト移相器の位相エラーの入力電力偏在度を示す。本試験での許容位相量は ± 0.82 度である。Figure_3 のグラフより、入力電力 50MW まで ± 0.8 度以内であることがわかった。この結果より、移相型の 50MW 真空 4 ポートサーキュレーターが製作可能であることがわかった。しかしながら測定結果は振動しており、この振動が電力依存性によるものなのか、ノイズによるものなのかを確認する必要がある。したがって、今後精度良く測定を行うために、位相量の大きな移相器を用いた大電力試験を行う必

要がある。

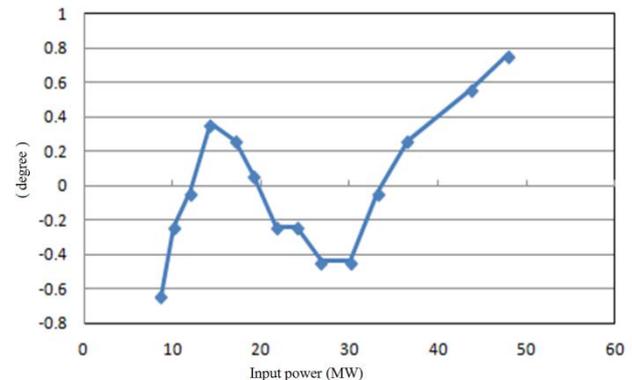


Figure 3: The error of detected phase shift depended on input RF power. The vertical axis is obtained expressed in degrees of change in the difference between the detected phase.

4. まとめ

Y 型真空サーキュレーター(最大ピーク電力 30MW、但し中心値 $\pm 10MW$ の範囲のみ)より、耐電力の高い真空サーキュレーターを実現するために、ハイブリッド合成器の許容位相量の計算を行った。これにより、サーキュレーター用移相器として必要な真空フェライト移相器の位相量 90 度に対しての、ハイブリッド合成器の許容位相量が ± 11.5 度であることがわかった。ただし反射と分配比エラーは含まれない。

真空フェライト移相器の大電力試験を行い、許容位相量 ± 0.82 度内で入力電力を 50MW まで投入できることがわかった。これにより、移相型の 50MW 真空 4 ポートサーキュレーターが製作可能であることがわかった。

5. 謝辞

本大電力試験にあたり、SPring-8 関係者の方々に多大なご尽力を承り、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. Miura, et al., “大電力真空サーキュレーターの開発”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [2] T. Taniuchi, et al., “S-band Vacuum Isolator and Circulator for Injector System of SPring-8 Linac”, Proc. of the 2nd International Particle Accelerator Conference, San Sebastian, Spain, 95(2011).
- [3] T. Taniuchi, et al., “Vacuum Waveguide System for SPring-8 Linac Injector Section”, Proc. of the 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, June 15-20, 2014, 3863-3865(2014).
- [4] A. Miura, et al., “真空大電力サーキュレーターの開発”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.