

## 論文の内容の要旨

論文題目     **Inverter-Converter Bridge (ICB) エネルギー転送回路を利用した超電導マグネット励磁電源システムの研究**

氏 名         馬 場   旬 平

超電導マグネットは低損失で強磁界を発生可能であり物理実験用マグネット、核融合プラズマの閉じ込め・安定化コイルや同期発電機の励磁部分、核磁気共鳴診断装置、結晶成長装置、さらにエネルギー蓄積を目的としたSME Sなどに適用することが考えられている。超電導マグネットの励磁には大きなエネルギーが必要であり、特に核融合用マグネットなどでは急速な励磁が必要であり、システムから直接励磁エネルギーを得ると大きなパルス負荷となる。システムに大きな外乱を与えるため、別の超電導マグネットにエネルギーを徐々に蓄積し、必要なときにマグネット間でエネルギーを転送する事が考えられた。マグネット間エネルギー転送を実現するため、図1示す Inverter-Converter Bridge (ICB) エネルギー転送回路方式が提案された。

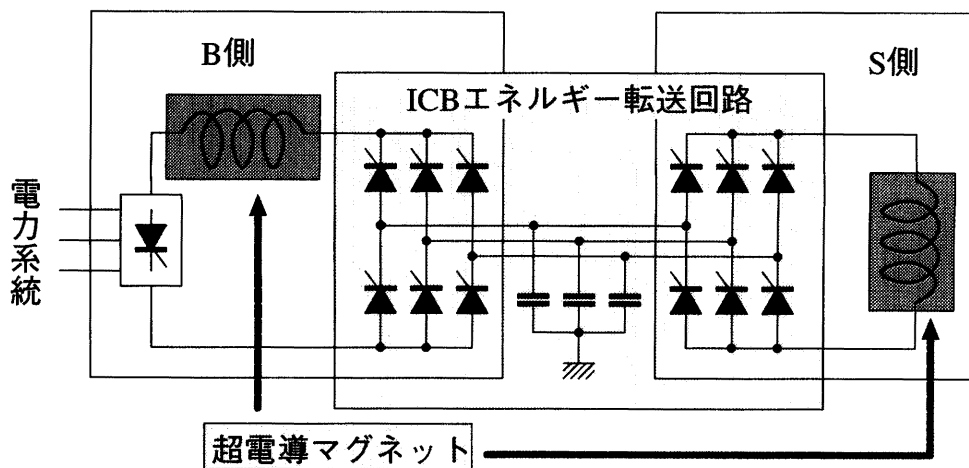


図1 ICB エネルギー転送回路を利用した超電導マグネット励磁システム

他励式変換器を利用した ICB エネルギー転送回路の動作特性は、Fuja らによって提案された、定性的特性から制御位相角と出力電圧の関係が三角関数を利用して記述出来ると仮定した近似解が利用されていた。当初、ICB エネルギー転送回路は一定の制御位相角でのみ運転する事が考えられていたため、この解析解で十分であった。その後、三相 ICB エネルギー転送回路において  $\alpha$ - $\beta$  変換を利用して点弧パルスを制御する方法が提案され、位相角の変更を行う事により転送電力制御の可能性が出てきた。

そこで近似解ではなく詳細な動作解析が行われ、位相角と出力の関係は二次関数で記述可能である事が判明し、同時に二変換器の位相角差は  $\pm 90^\circ$  の範囲のみならず、 $\pm 180^\circ$  の範囲で変更可能である事が判明した。また、B 側電流  $I_B$  と S 側電流  $I_S$  の比  $k = \min\left(\frac{I_S}{I_B}, \frac{I_B}{I_S}\right)$  により決定される転流可能条件

の存在も明らかにされた。位相角の範囲が拡大する事により、直流側電圧の増加は認められないが同じ直流電圧を小さな電圧リップルで出力可能となる。電流比  $k$  による制限の範囲内で電圧リップルの小さい位相角を選択する位相角決定法を位相角によるリップル低減制御と呼ぶ。しかし、起動時や位相角によるリップル低減制御は実験を行うと非常に動作が不安定であり、原因が究明されることなく放置されるに至った。

実験結果から位相角によるリップル低減制御における動作不安定性の原因を突き止める努力がなされたが、現象の再現性が悪く、問題の本質が理論の実装にあるのか、理論の誤りであるのかすら判明しない状況であった。本研究では不安定現象の実験例を収集し、発生状況を整理すると不安定現象には複数の原因が存在し、それらが確率的に発生することで一見すると無秩序に発生すると見受けられる不安定現象が引き起こされていることを突き止めることができた。

位相角によるリップル低減制御の動作不安定性を引き起こす原因は次の三種類であることが判明した。

1. リプル低減制御開始時に発生するバイパスペア
2. リプル低減制御時における転流重なりとその後に発生するバイパスペア
3. リプル低減制御時、終了時に発生するスルーモード

リップル低減開始時に発生するバイパスペアは従来の解析において位相角指令の大幅な変動を考慮していなかったがために、転流失敗が発生し、結果としてバイパスペアが発生する現象である。解析の結果、転流前の点弧モードと指令の点弧モードの関係で発生条件が記述できることが示された。指令値が変化するタイミングによってこの条件に適合する可能性が出るが、条件に当てはまる確率は、 $k$  によって決定される。図 2 にバイパスペア発生時の発生可能性のある領域を示す。また、図 3 に発生可能性の分布を示す。

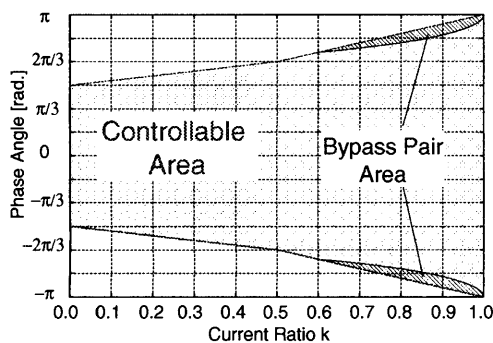


図 2 バイパスペアが発生する可能性のある領域

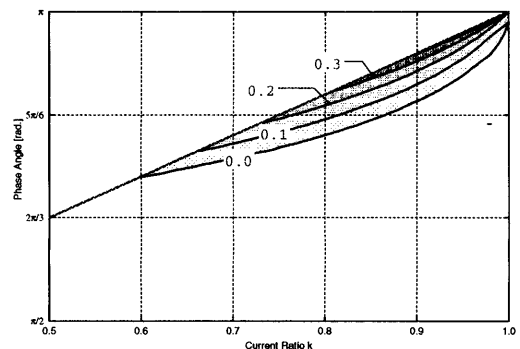


図 3 バイパスペアが発生可能性

バイパスペア発生時の条件が単純であることが解明されたので、この条件を満たす場合は点弧パルスを阻止すれば問題を回避できることを理論的に示し、実際に実験によりその効果を確認することに成功した。

転流重なりは通常他励式変換器においては大きな問題であるが、ICB エネルギー転送回路では交流側にリアクトルを挿入する必要がないため、従来は問題にならないと考えられて来た。しかし、数  $\mu\text{H}$  程度の極微小な浮遊インダクタンスによって大きな影響を受け、その結果、 $k$  のみによって決定されるとされてきた動作可能範囲が、浮遊容量、コンデンサバンク容量並びに転送周波数による関数によっても制限を受けることが判明した。図 4 にその様子を示す。

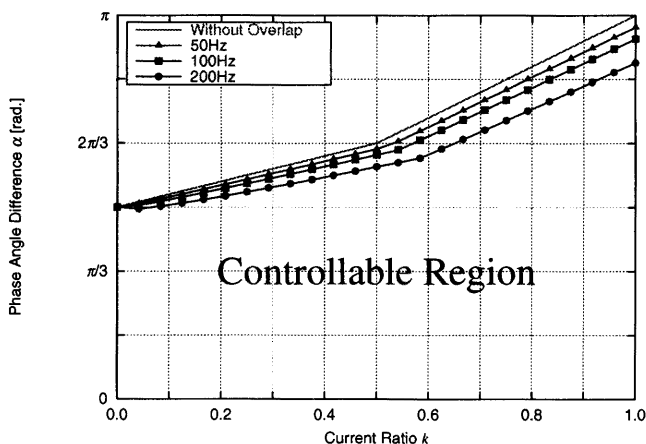


図 4 転流重なりを考慮した動作可能領域

スルーモードは B 側と S 側の同じ相が点弧しているがアームの上下が異なる状態を指す。特に双方の電流の差が小さい場合、この状態ではコンデンサバンクに殆ど電流が流入しないため、 $\alpha - \beta$  平面上の軌跡が停滞し、最終的には転流持続に必要な電圧の維持が不可能となり転流停止に至る。この状態を脱するために、適切なモードを採用する事により回避できる事を実験的に証明した。

起動時の不安定性は通電電流と入力電力の関係で記述され、特に B 側電流を過剰に小さくすると発生する事が示された。起動時のみならず、実験により起動後にも発生しうる事を証明し、ICB エネルギー転送回路の設計時に安定動作の条件を考慮する必要がある事を示した。

ICB エネルギー転送回路を利用する上で懸案となっていた動作不安定性が解消されたことを受け、単にパルスマグネット励磁電源として ICB エネルギー転送回路を利用するのみならず、SMES など他の電力系統に接続する事を目的とした応用に適用する事を提案した。ICB エネルギー転送回路では超電導マグネットを二つ利用するが、これらのマグネットの電流比は蓄積エネルギーによらず任意の値に決定可能である事を利用し、系統連系変換器の有効利用を図る事が可能である。

超電導マグネットと電力系統の連系を行う変換器の出力は変換器の直流電圧とマグネット電流の積となる。しかし、通常マグネット電流は貯蔵エネルギーによって決定されるため、電圧のみが制御可能であった。ICB エネルギー転送回路を利用すると系統連系変換器に流れる電流の制御が可能となる。

本論文では制御性が悪い他励式変換器を例題として考えた。他励式変換器では電力の制御可能範囲が狭いが、ICB エネルギー転送回路を利用することにより制御可能領域を広げる事が可能となる。例えばダブルサイリスタブリッジの出力特性は図 5 に示すように有効無効電力を独立に制御しうる範囲に大きな制約があるが、B 側電流を制御することにより通常のサイリスタブリッジにおいても図 6 に示すような広い範囲での電力特性をとることが可能となる。

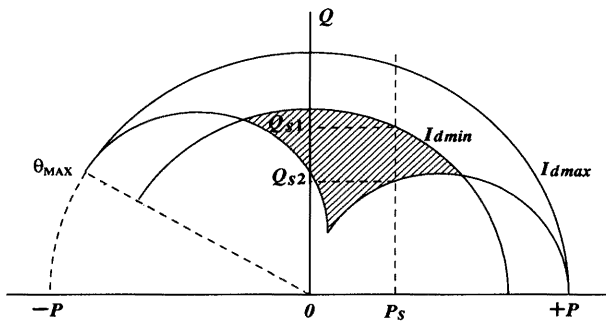


図5 ダブルサイリスタブリッジの電力特性

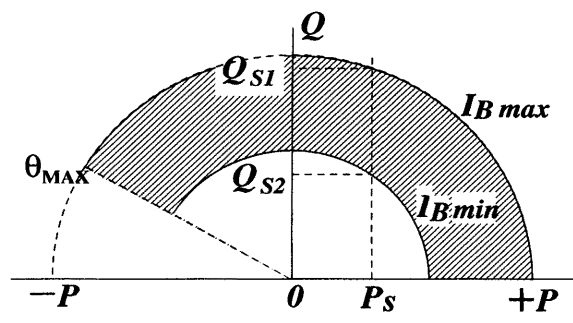


図6 B側電流制御を考慮したサイリスタブリッジ電力特性

このような適用を考えた場合、B側マグネット電流制御が重要な技術となる。実際にPI制御を利用した電流制御系を設計し、その有用性について検証実験を行い確認した。また、バッファ電流制御と系統連系変換器制御を組み合わせ、他励式変換器を系統連系変換器に接続した場合の実験結果の一例を図7に示す。

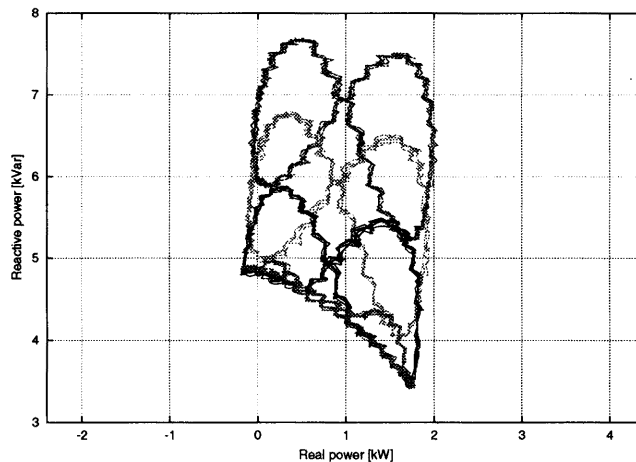


図7 バッファ電流制御による出力特性改善効果の検証実験結果

図7では蓄積エネルギーを一定に保ちつつ、有効電力と無効電力を周期的に変化させている。通常他励式変換器では不可能であった有効電力と無効電力の独立制御が達成されていることが分かる。自励式変換器を適用した場合においても変換器容量の抑制が可能となり、今後超電導マグネット電源への適用が期待される。

以上まとめると本論文では三相ICBエネルギー転送回路の動作不安定現象の解析を行い、原因の解明に成功し、その成果を利用した安定化手法を提案した。実験によってその有効性を示し、実用に耐え得る事を示す事に成功した。従来パルス超電導マグネットに対する適用のみが考えられていたICBエネルギー転送回路を系統連系を考慮したマグネット励磁電源システムとして利用する事を提案し、その有用性を示す事ができた。ICBエネルギー転送回路は超電導マグネットの様々な応用において適した特徴を有しており、今後の応用が期待される。