# 高温超電導変圧器の励磁突入電流によるクエンチ特性

西宮 幸希夫\*1,石郷岡 猛\*2,二ノ宮 晃\*3,新井 和昭\*4

Quench Characteristics of High Temperature Superconducting Transformer for Inrush Current

Sakio NISHIMIYA<sup>\*1</sup>, Takeshi ISHIGOHKA<sup>\*2</sup>, Akira NINOMIYA<sup>\*3</sup>, Kazuaki ARAI<sup>\*4</sup>

**ABSTRACT** : As well known, an inrush current of transformer reaches about 10 times larger than the rated current. When such a large inrush current flows into a superconducting transformer, it will induce a quench of superconducting windings. In this paper, we fabricated a small experimental superconducting transformer, and investigated the behavior of superconducting winding against the inrush current. The experimental result shows that a superconducting winding quenches for such a large inrush current, but it returns quickly to superconducting state in few cycles spontaneously.

Index Terms : superconducting transformer, inrush current, quench, core saturation

(Received March 25, 2007)

# 1. 序 章[1]

一般に、変圧器を系統に投入する際に、鉄芯の飽和や ヒステリシスによって発生する励磁突入電流は、定常電 流の十倍程度に達すると言われている。通常、励磁突入 電流は数サイクル後には消滅するが、もしこの大電流の 値が超電導巻線の臨界電流を超えるならば、超電導巻線 はクエンチを引き起こす可能性がある。もし、2 次側に 負荷が接続されていなければ、励磁突入電流が発生して も、数サイクル後には消滅し励磁電流のみになるので、 超電導巻線がクエンチしたとしても、数サイクル後には 復帰できる可能性がある。しかし、系統投入時に変圧器 が負荷接続状態であれば、励磁突入電流消失後も定常電 流が発生し続けるので、一旦クエンチが生じると熱的損 失などにより超電導状態への復帰が困難になることが考 えられる。

本研究は,超電導変圧器の実用化には重要な問題であ る励磁突入電流に対する特性を調査し,検討・考察を行 った。実験は,試作した小型超電導変圧器に励磁突入電 流を印加し,このときの線材に発生する抵抗性電圧,温 度等からクエンチの特性を調査,さらに2次側無負荷・ 実負荷状態両方の比較も行った。

#### 2. 励磁突入電流の原理

### 2.1 励磁突入電流とは<sup>[1][2]</sup>

励磁突入電流とは、変圧器を電力系統に投入する際、 変圧器の鉄芯の飽和現象によって発生する大電流のこと である。この大電流は過渡的に発生し、定常電流の十倍 程度まで達するといわれており、電力機器へ大きな影響 を与えるものである。

励磁突入電流の発生原理を、図1に示す。巻数Nのコ イルに発生する電圧vと磁束 $\phi$ の関係は式(1)で与えられ る。なお $\phi_0$ は残留磁束である。

$$\phi = \frac{1}{N} \int_0^t \mathbf{v} dt + \phi_0 \qquad \qquad \cdot \cdot \cdot (1)$$

定常状態における最大磁束は,投入位相角が0度の時, 印加電圧の実効値を V とすると,(2V/ωN)+φ<sub>0</sub>となる。 鉄芯の飽和特性により,励磁電流のピーク値はさらに拡 大され,定常電流の十数倍の突入電流が発生する。通常 励磁突入電流は,巻線の持つ抵抗成分などにより,数サ イクルで消滅する。

<sup>\*1:</sup>大学院電気電子工学専攻博士前期課程

<sup>\*2:</sup> 電気電子工学専攻教授(ishigoka@st.seikei.ac.jp)

<sup>(</sup>Professor, Dept. of Electrical and Mechanical Engineering) \*<sup>3</sup>: 電気電子工学専攻助手

<sup>\*4:</sup>独立行政法人 產業技術総合研究所 主任研究員



### 図1 励磁突入電流の発生原理

# 2.2 励磁突入電流と超電導変圧器

もし励磁突入電流が導体の臨界電流を超えると,超電 導線はクエンチするが,励磁突入電流は過渡的であるた め,数サイクル後には超電導状態へ復帰できる可能性が ある。この現象は導体内で発生する熱損失に依存すると 考えられる。ただし,2次側に負荷が接続された状態で 励磁突入電流が発生すると,突入電流が消滅したあとも 負荷電流が流れ続けるため,発生した熱が充分冷却され ずに超電導状態への復帰が困難になると考えられる。

# 3. 試験装置

#### 3. 1 超電導変圧器

# 3.1.1 構成

本研究では,Bi2223/Ag 超電導テープ線材で巻かれた 超電導巻線と鉄芯から構成された超電導変圧器を試作し た。巻線は巻数40のパンケーキコイルを1ユニットとし, 1次側は2ユニットを直列接続,2次側は並列接続して おり,変圧比は2:1となる。コイルの諸元は表1の通り である。なおこれらコイルは産業技術総合研究所で製作 したものを使用した。

また1次巻線内側には、2箇所に銅-コンスタンタン熱 電対を、1次・2次巻線間には、磁束検出コイル(3次巻 線)を取り付けた。鉄芯は珪素鋼板で、巻芯と密に取り付 けられている。全体のサイズは幅 250mm×高さ 140mm× 奥行き 250mm である。変圧器の外観を図2,鉄芯の寸 法を図3, B-H特性を図4に示す。



図2 変圧器外観



UNIT:[mm]

\*Cross Section of Core : Score =3.6  $\times\,10^{-3}[m^2]$ 

図3 鉄芯寸法

表 1 変圧器諸元表

	Primary	Secondary
Materials of Winding	Bi-2223/Ag HTS Tape	
Inner Radius of Coil	88.5mm	
Outer Radius of Coil	124mm	
Number of Turns	80	40
Connect	2 Series	2 Parallel
Size(W×H×D)	250mm×140mm×250mm	





### 3.1.2 巻線の直流臨界電流

巻線の直流臨界電流を知るために,直流電流による電 流-電圧特性を調べた。図5に電流-電圧特性を示す。

Bi-2223超電導線材のクエンチの定義は、一般的に 1µV/cm以上の抵抗性電圧が生じた時とされている。この 超電導巻線1ユニットの線材長は、およそ27.2mであるので、図5で抵抗性電圧が2.72mV発生した電流が臨界電流となり、結果から59.5Aとわかった。



# 3.1.3 定格

この変圧器の定格を表2のように定めた。容量3kVA 級の変圧器としては通常の1/4ほどのサイズになる。

	Primary	Secondary		
Rated AC Voltage at 50Hz	100V	50V		
Rated AC Current	30A	60A		
Maximum Flux Density		1.5T		
Capacity		3kVA		

#### 表2 変圧器定格

### 3. 2 電源投入位相角制御装置

# 3. 2. 1 構 成<sup>[6]</sup>

励磁突入電流を発生させるため,電源に変圧器を投入 する際の電圧位相角を制御する必要がある。そこでIGBT を用いた電源投入位相角制御装置を作成した。詳細は成 蹊大学理工学研究報告Vol.43 No.1 pp.51-52を参照。装 置外観を図6に,構成概略と動作原理を図7に示す。

# 3. 2. 2 動作試験

電源投入位相角制御装置の動作試験を行った。その時 の負荷の電流,電圧波形の一例を図8に示す。



図6 電源投入位相角制御装置外観



図7 構成概略図(上)と動作原理(下)



図8 負荷の電流,電圧波形(投入位相角90度)

# 4. 実験

#### 4. 1 無負荷試験<sup>[3]</sup>

変圧器2次側を開放して励磁突入電流を印加する実 験を行った。図9は実験回路を示す。なお超電導変圧器 は液体窒素で冷却し,電源電圧の投入位相角は,励磁突 入電流が最大になる0度とした。

図10,11は1次側の電流・電圧波形である。電源電圧 をそれぞれ100V,130Vとして励磁突入電流の最大値が臨 界電流の3倍,および5倍になるようにした。励磁突入 電流の最大値はそれぞれ199.3A,325.4Aであった。図10, 11では巻線臨界電流を超える励磁突入電流が発生するが, 数サイクルで消滅した。



図9 実験回路(無負荷試験)



図10 無負荷試験時の1次側の電流・電圧波形 (電源電圧100V)



(電源電圧130V)

# 4. 2 実負荷試験<sup>[3]</sup>

変圧器2次側に抵抗負荷を接続し実験を行った。図12 に実験回路を示す。電源電圧100Vおよび130Vに対する 1次側の電流,電圧波形をそれぞれ図13,14に示す。

負荷抵抗は 1.1Ω で,定常電流は臨界電流の 0.9pu にな るよう設定した。

電源電圧 100V, 130V に対し, 励磁突入電流の最大値 はそれぞれ 200A, 300A になった。それらは,数サイク ルのうちに消滅し定常電流になる。励磁突入電流自身は 負荷抵抗には依存しないことが判る。



図12 実験回路(実負荷試験)



図13 実負荷試験時の1次側の電流・電圧波形 (電源電圧100V)



図14 実負荷試験時の1次側の電流・電圧波形 (電源電圧130V)

# 5. 解析・考察

### 5.1 抵抗性電圧

得られた結果から巻線のクエンチの様子を判別するた め,抵抗性電圧の抽出を行った。

得られた各々の電圧波形は,誘導性電圧を含む。そこ で磁束検出用の3次巻線の電圧を用いて誘導性電圧の除 去を行った。なお,このようにして得られた波形にはま だ誘導性電圧がかなり含まれており,「準抵抗性電圧」と 称する。

### 5.1.1 無負荷試験

図 15,16 に無負荷試験における準抵抗性電圧波形を示 す。なお電源電圧はそれぞれ 70V,130V である。







# 図16 無負荷試験における準抵抗性電圧波形 (電源電圧130V)

各準抵抗性電圧波形には、かなり誘導性電圧が含まれ ている。そこで励磁突入電流のピーク値における電圧に 注目をした。通常誘導成分であれば、電流変化のないピ ーク値では存在しないので、これを「抵抗性電圧」とし た。

図15に示すように励磁突入電流ピーク値が臨界電流以 下であれば抵抗性電圧は発生していない。つまり巻線は クエンチせず,超電導状態に止まっていることを示す。

一方,図16に示すように臨界電流を上回る値の励磁突 入電流になると抵抗性電圧が発生する。しかし臨界電流 を超えた第一波以降,励磁突入電流は定常状態へ向け減 衰をしてゆく。どのケースにおいても臨界電流以下に落 ち着くと抵抗性電圧は消滅していることが判る。つまり 一旦クエンチした超電導線材は、すぐさま超電導状態へ 復帰した。これは、臨界電流を超えている時間が非常に 短く、それに対し液体窒素による冷却が充分に行われて いるからと考えられる<sup>[4]</sup>。

図17に発生した抵抗性電圧と電流の関係を示す。測定 点が示されている線は無負荷実験により得られた抵抗性 電圧のピーク値を,細線は図5から得られた近似指数曲線 を,太線は図5の結果から得られたn値を理論式(2)に代入 し算出した理論曲線を示す。式(2)は,超電導体における 臨界電流付近での電流・電圧の関係式である<sup>[8]</sup>。

(a)V: 発生電圧[V]

(b)I:印加電流[A]

(c)Eo: クエンチ時に発生する電圧(定義 1µV/cm)

(d)n: 超電導線材の性能を示す指標 n 値(図 5 よりおよ そ 15)

(e)Ic:臨界電流值[A]

直流電流印加による近似曲線(細線),およびn値より 算出した理論曲線(太線)は,臨界電流値を超えると急激 に電圧が上昇する形になっている。



図17 超電導変圧器巻線の電流-電圧特性

実験によって得られた励磁突入電流に対する抵抗性電 圧は、直流に対する特性に比べ低い電流値で電圧が発生 しはじめている。これは交流ヒステリシス損による影響 と思われる。一方、臨界電流以上では直流よりも電圧が 低い。これは励磁突入電流が連続的電流ではなく間欠的 パルス電流のため、冷却の効果が出ていることによると 思われる。

#### 5.1.2 実負荷試験

同様の解析を実負荷試験においても行った。図18, 19 に負荷試験における準抵抗性電圧波形を示す。

-5-



# 図18 実負荷試験における準抵抗性電圧波形 (電源電圧100V)



# 図19 実負荷試験における準抵抗性電圧波形 (電源電圧130V)

State	Source	Peak of Inrush	Resistive
	Voltage[Vrms]	Current[A]	Voltage[V]
1.6Ω	100	211.1	20.9
	130	314.7	43.5
1.1Ω	100	213.3	19.5
	130	310.3	42.0

表3 電流ピーク値における抵抗性電圧の値

電流ピーク値における抵抗性電圧を表3に示す。電圧 130Vの時は、励磁突入電流の最大値が直流臨界電流の5 倍以上である300A近くまで達しているため、抵抗性電 圧のピーク値は約40V発生している。その後抵抗性電圧 は急速に減少し、約3サイクル後には消滅した。定常電 流が直流臨界電流の90%近くあり、クエンチによる熱が 維持されやすい環境にもかかわらず、抵抗性電圧は消滅 している。これは1次電流が臨界電流値を超えている時 間は非常に短いため、それ以外の時間に損失熱が冷却に より十分除去されるためと考えられる。

#### 5.2 抵抗性電圧による損失計算

5-1で議論した抵抗性電圧より、励磁突入電流第一 波における損失を計算した。しかし実験では、抵抗性電 圧のピーク値しか測定できなかった。そこで抵抗性電圧 は電流に比例する事に着目し、両者のピーク値を合わせ て、波形については電流波形を適用した推定波形を用い て損失を求めた。図 20 は電圧 130V での無負荷試験の時 の抵抗性電圧推定波形である。

上述の方法で算出した電圧波形を元に,式(3)より励磁 突入電流第1波において発生する損失を求めた。

$$Q_{pri} = \int_{0}^{T} v_{r} \cdot i dt \qquad \qquad \cdot \cdot \cdot (3)$$

(a)T: 励磁突入電流が臨界電流を上回る時間[sec]
(b)v<sub>r</sub>: 推定抵抗性電圧[V]
(c)i:電流[A]

(d)Qpri: 第1波で生じる一次側の損失[J]





図20 抵抗性電圧推定波形(無負荷試験・電圧130V)

図21 各試験における励磁突入電流第1波での損失

図21は, 無負荷試験, 実負荷試験(1.6Ω, 1.1Ω)におけ る, 励磁突入電流第1波での損失を示す。

励磁突入電流300Aの時の損失は、いずれも40J程度で あった。また、負荷の有無にかかわらず、励磁突入電流 によって発生する損失は同じであった。

#### 5.3 ジュール熱損失

臨界電流を超える電流が超電導線材に流れるとジュー ル熱が発生する。本節では、導体内で発生するジュール 熱の解析を行った。

銀シース超電導線材は、フィラメントがクエンチする と、それ以上の電流は銀材部分に転移する。本項では臨 界電流以上の電流が流れフィラメント部分がクエンチし、 電流が全て銀材部分に転移したと仮定し、励磁突入電流 第1波におけるジュール熱損失を求めた。電流と単位長 さ当たりのジュール熱 W[J/m]の関係を(4)式に示す。

$$W = \frac{\rho_{LN2}}{S} \int_0^T i^2 dt \qquad \cdots (4)$$

(a)ρ<sub>LN2</sub>:液体窒素中での銀の抵抗率<sup>[5]</sup>で、0.3×10<sup>-8</sup>[Ω・m]
(b) S:線材銀部分の断面積。線材総断面積=0.8×10<sup>-6</sup>[m<sup>2</sup>],

線材銀比=2.2<sup>[5]</sup>より, 0.55×10<sup>-6</sup>[m<sup>2</sup>]

(c) i: 電流[A]

(d) T: 電流が臨界電流を上回る時間[sec]

巻線は断熱状態を仮定し,各実験での状況を想定して 計算を行った。なおこの条件は銀材すべてに電流が転移 していることを考えているため,充分余裕のある検討に なっている。図 22 は無負荷試験,実負荷試験(1.6Ω, 1.1Ω) の計算結果である。







めた損失の比較

いずれの結果も、励磁突入電流300Aでは50J程度の損 失が発生した。また負荷の有無に関わらず同様の結果が 得られた。図23は前節で行った実験値解析(図10)との比 較である。

実験で得られた抵抗性電圧から求めた損失と比較する と,計算結果は損失が大きくでている。これは計算の条 件(完全断熱,および電流のすべてが銀材に転移すると仮 定)が過剰に厳しいためで,実際には液体窒素による冷却 と,一部電流が超電導フィラメントに流れる効果がある ことによると思われる。

次に銀材の熱容量から,第1波においての温度上昇ΔT を,式(5)を用いて求めた。

$$\Delta Q = C_{77} \cdot \Delta T [J] \qquad \cdot \cdot \cdot (5)$$

(a) AQ: 第1波での蓄積ジュール熱[J]

(b)C<sub>77</sub>:液体窒素中での銀の熱容量[J/K] 銀の比熱は<sup>[7]</sup>160[J/K・kg],銀の密度<sup>[8]</sup>は 10490[kg/m<sup>3</sup>]なので、C<sub>77</sub>=0.92[J/K]

各状態での計算結果を図24に示す。励磁突入電流が 300Aに達したとしても、温度上昇は2K程度と考えられる。 Bi2223高温超電導体の臨界温度<sup>[5]</sup>はおよそ110Kなので、 この温度上昇では、臨界温度以上に達することはないと 推測される。



図24 銀の比熱からもとめた励磁突入電流第1波で発生 する温度上昇の電流依存性



図25 熱電対取り付け位置

実験では、図 25 に示す様に、1 次巻線の2 次巻線側・ 鉄芯下部に位置 2 カ所に銅-コンスタンタン熱電対を付 け温度測定を行った。図 26 に電圧 70V(励磁突入電流最 大 40A)無負荷試験,図 27,28,29 に電圧 130V(励磁突 入電流最大 300A)時の無負荷試験,および実負荷試験(負 荷抵抗 1.6Ω,1.1Ω)の温度波形を示す。いずれの結果も 継続的な温度上昇は見られなかった。励磁突入電流によ って発生する熱量が蓄積する時間に対し、冷却される時 間が長いため温度上昇が少なかったこと、および熱電対 の応答速度が低かった事によると考えられる。











図28 実負荷試験温度波形(電圧130V, 負荷抵抗1.6Ω)



図29 実負荷試験温度波形(電圧130V, 負荷抵抗1.1Ω)

#### 5.4 総括

5.1, 5.2, 5.3 節で行った解析より,高温超電導変圧器 に臨界電流の約5倍,定格電流の約10倍の励磁突入電流 が流れると,超電導変圧器1次巻線はクエンチを起こし, 励磁突入電流第1波で50J程度の損失が発生した。

その後, 励磁突入電流の減衰とともに, クエンチした 超電導体は超電導状態へと速やかに復帰することがわか った。

また変圧器励磁時に2次側に負荷が接続された状態で も、50J程度の損失、2K程度の温度上昇が発生したが、 それら損失は励磁突入電流の減衰と共に減衰し、負荷電 流が流れる定常状態であっても、超電導状態に復帰して そのまま運転が可能であることもわかった。

つまり超電導変圧器を製作・運転する上で,定格電流 の10倍程度の励磁突入電流であれば,対策等を施す必要 はないと言える。しかし臨界電流の10倍,定格電流の 20倍程度の励磁突入電流が発生したとすると,ジュール 熱損失は約200J,温度上昇10K以上になると思われ,冷 却条件によっては超電導変圧器の臨界温度を突破し,超 電導状態へ復帰することが困難になる恐れがある。

# 6. 結 論

本論文は,超電導変圧器を電力系統に投入する際に時 折発生する励磁突入電流に対する特性を調査するため, 小型の超電導変圧器を試作し,励磁実験を行った。実験 結果から,以下の結論を得ることが出来た。

- (1) 超電導変圧器に直流臨界電流の5倍,定格電流の 10倍程度の励磁突入電流が発生すると,抵抗性電圧 が発生し、クエンチを起こす。
- (2) 発生する損失は, 無負荷状態・実負荷状態ともに 約40J程度であった。
- (3) 発生する損失による温度上昇は最大で2K程度と 推定される。
- (4) 励磁突入電流によってクエンチを起こした超電導 変圧器は、励磁突入電流の減衰とともに超電導状態 へと復帰することが可能である。
- (5) 上記の理由としては, 励磁突入電流の発生時間が 冷却時間に対して短いため, 蓄積されたジュール熱 損失が充分冷却されるためであると思われる。
- (6) 2次側に負荷を接続した状態で励磁突入電流が発生したとしても、(5)と同様の理由により超電導状態へ復帰することが可能である。
- (7) 超電導変圧器を製作・運転する上で、定格電流の 10倍程度の励磁突入電流であれば、対策等を施す必 要はない。

ただし,超電導状態への復帰に関しては,変圧器のサ イズ,巻線構造に伴う冷却条件,等々に依存することが 考えられるので,今後の実器の開発に関しては更なる検 討が必要であろう。

### 参考文献

- Takeshi Ishigohka, Kenji Uno, and Sakio Nishimiya, "Experimental study on Effect of In-rush Current of Superconducting Transformer" *IEEE Transaction on applied superconductivity*, vol.16, no.2, pp.1473-1476, June 2006.
- [2] John H. Brunke, Klaus J. Frohlish, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching Part1:Theoretical Considerations" *IEEE Transaction on Power Delivery.* vol.16, no.2, pp.276-279, April 2001.
- [3] Yusherlg Zhou, Qingshuo Song, Fang Guo, Jingdong Li, and Yuejin Tang "Quench Developing Process of HTS Tapes Under Sinusoidal

Over-Currents" *IEEE Transaction. Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp.1651- 1654, June 2005.

- [4] K. Mutsuura, H. Shimizu, Y. Yokomizu, and T. Matsumura, "Characteristics of Flux Flow Resistance Generation in Bi2223 Bulk Supplied Pulse Current" *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol.15, no.2, pp.2003-2006, June 2005.
- [5] K. Yamazaki, S. Kobayashi, T. Katou, K. Ookura, M. Ueyama, J. Fujikami, N. Ayai, E. Ueno, M. Kikuchi, K. Hayashi, and K. Satou, "Development of Bi-Based Superconducting Wires" *Sumitomo Electric Industries, Ltd. Technical Review.* March 2004.
- [6] 江尻雄一, 亀田悦正「任意の位相タイミングで投入 するスイッチ回路の研究」 富山工業高校 研究報 告書 2002年
- [7] 低温工学データブック 低温工学協会関西支部 1997 年1月
- [8] 超伝導・低温工学ハンドブック 低温工学協会 1993 年11月