

超電導コイルとコンデンサの LC 共振を利用した 系統電圧安定化装置の試験と実用化への道筋

川嶋 忍^{*1}, 二ノ宮 晃^{*2}, 石郷岡 猛^{*3}

Test and Way to the Realization of Power System Voltage Stabilizer using LC Resonance Circuit with Superconducting Coil and Capacitor

Shinobu KAWASHIMA^{*1}, Akira NINOMIYA^{*2}, Takeshi ISHIGOHKA^{*3}

ABSTRACT : These days, voltage stability of power system is very important for example in semiconductor industries. So, development of a device suppressing voltage sags in power system is expected. In this article, the authors propose a new voltage stabilizing device using a LC resonance circuit composed of superconducting coil and capacitor connected in parallel. This power system voltage stabilizer acts automatically against a voltage sag or a steep voltage change, and it suppresses the voltage drop for several cycles by releasing its stored energy. The authors have confirmed this principle experimentally using a small model system using a LC resonance circuit with a superconducting coil and a capacitor. The experimental results and some theoretical analyses are presented.

Keywords : voltage stabilizer, voltage sag, LC resonance circuit, superconducting coil

(Received March 23, 2009)

1. はじめに

近年、半導体産業におけるエレクトロニクス機器の精密化や、情報産業などの発展によるコンピュータの高度情報化・ハイテク化に伴い、電力系統における電圧の安定性が非常に重要になってきている。そこで、本論文では超電導コイルとコンデンサから成る、LC 並列共振回路を用いた、新しいタイプの瞬時電圧安定化装置を提案し、各種電圧変化に対しての本装置の持つ電圧抑制効果の実験的に確認したが、今回は実験結果に対する考察そして実用化への道筋を示す。

2. 原 理

本研究では住友電気工業株式会社製のビスマス系高温超電導コイルを利用した、LC 共振並列回路を作りエネルギーを蓄積する。図 1 に本方式の原理を示す。本装置

を負荷端に設置すれば、瞬低などの電源の変動や負荷の急変に伴う負荷端電圧の変化を抑制する事が可能である。

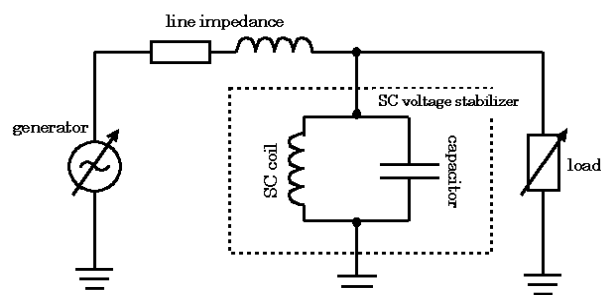


図 1 LC 共振回路を用いた電圧安定化装置の原理図

3. 実験方法及び結果

3. 1 LC 共振特性

本実験に使用した超電導コイルを図 2 に、共振周波数が 50Hz 程度になるようにコンデンサを並列に接続した時の共振特性を図 3 に示す。なお、この時の共振周波数は 50.9HZ, Q 値は 71.7 であった。印加電圧は 100V である。

^{*1} : 電気電子工学専攻修士学生 (dm073205@cc.seikei.ac.jp)

^{*2} : 電気電子工学専攻助教 (ninomiya@st.seikei.ac.jp)

^{*3} : 電気電子工学専攻教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

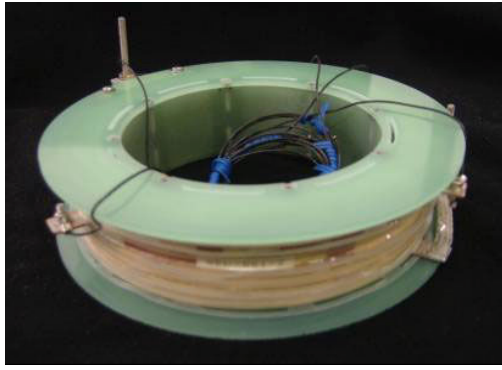


図 2 高温超電導コイル ($L=23.2\text{mH}$)

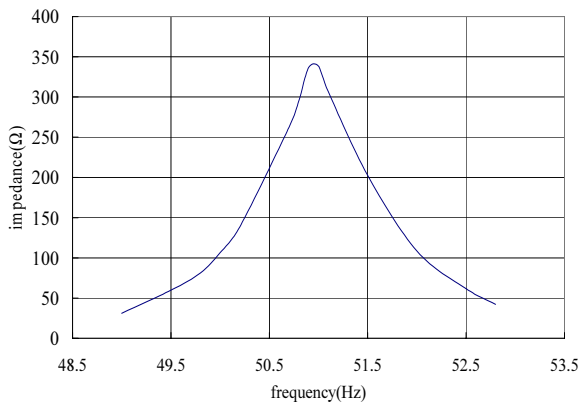


図 3 共振特性

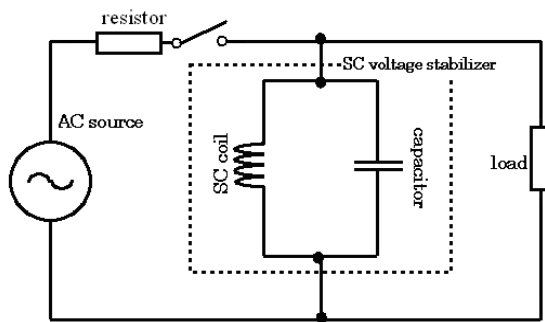


図 4 電圧補償動作実験回路（電源切り離し）

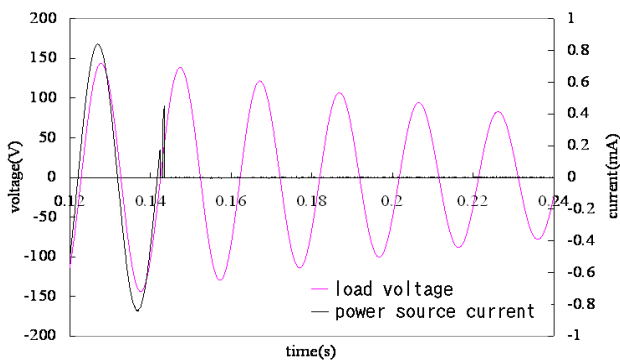


図 5 電圧補償動作実験結果

3. 2 電源切り離し時の電圧変動特性

本装置単独での電圧補償能力を確認するため図 4 に示す回路を用い、電源切り離し実験を行った。これは、雷害等による地絡故障時を想定してある。その結果を図 5 に示す。なお、負荷は 400Ω である。

同図より 3 サイクル目の電圧の最大値は電源切り離し前に比べると 25% 減衰していることが読み取れる。しかし、負荷電圧波形に激変は見られず、負荷へのエネルギー供給は一気に途絶える事なく漸減し、数サイクル程度の遮断の後に電源が復旧すれば、負荷への給電は持ちこたえる事が出来ると思われる。

なお、この時負荷に供給された全エネルギーは 2.07J であるが、本共振回路における初期蓄積エネルギーは約 4.18J であるため、抽出エネルギーが最大で蓄積エネルギーの約半分であることが判る。この理由としては、超電導コイルの交流損失等による共振回路内の損失の影響によるものと思われる。

3. 3 負荷急変時の電圧変動特性

図 6 の回路で、スイッチを突発的に閉じ、その 3 サイクル後にスイッチを開いて負荷を急変させ、負荷端電圧の電圧変動を観測した。実際の負荷急変の状況としては、製鉄所の圧延負荷や将来のリニアモーターカー等の間欠的負荷変動を想定している。今回は、それを直列につないだ 2 つの負荷のうち 1 つを短絡させることにより再現した。図 7 に負荷急変実験における本装置がある場合の負荷端電圧の変化を、図 8 に本装置がない場合の変化をそれぞれ示すが、図 7 および図 8 から、本装置がある場合は、負荷端電圧の変動が抑制され、定常電圧の瞬時電圧低下が抑制されている事が分かる。すなわち、本安定化装置がある場合は、負荷短絡後 3 サイクル目の電圧低下は約 5.0% であるのに対し、本安定化装置が無いと負荷短絡直後に、約 20% もの減衰が見られている。これから、本装置の効果が確認される。

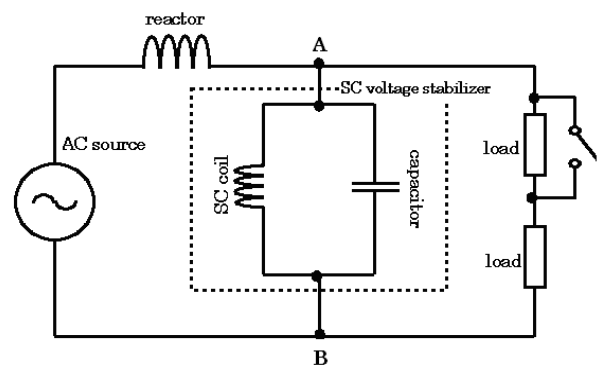


図 6 負荷急変再現実験回路

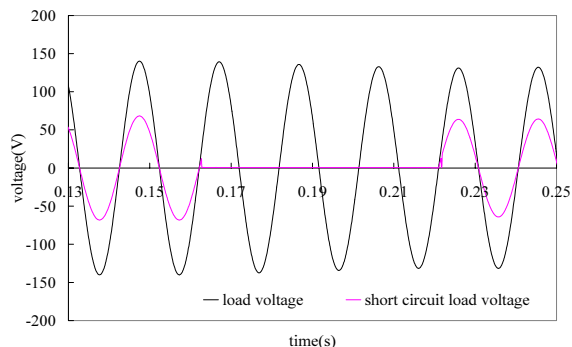


図 7 電圧変動特性（本装置あり）

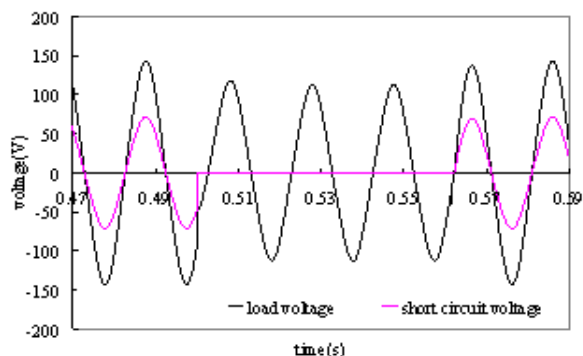


図 8 電圧変動特性（本装置なし）

4. 考察

4. 1 理論式から内部抵抗の算出

ここで LC 共振回路の内部抵抗を知るために超電導コイルに抵抗が存在するものとして、図 9 の回路を考える。そして、あるタイミングで電源が切り離された時の負荷電圧の変化の様子を理論式から求め、それと実験結果とを照合し、超電導コイルの内部抵抗値を算出する。この方法で図 5 の実験結果に当てはめたものを図 10 に示す。

この実験では LC 共振回路に 100V を印加したが、その実験結果に対応する内部抵抗 r は 0.166Ω となった。なお、この抵抗は超電導コイルの交流損失、および回路内にある接触抵抗などから生じたものであると考えられる。

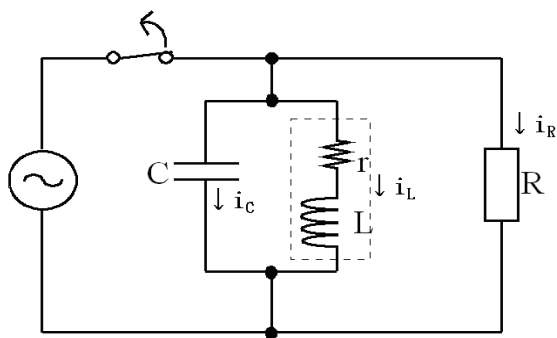


図 9 内部抵抗測定用回路

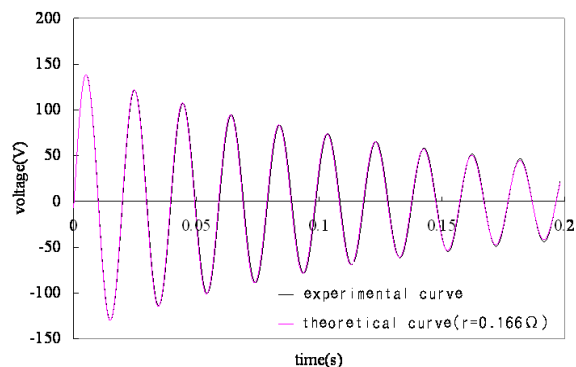


図 10 理論値との比較

4. 2 電圧減衰結果から電圧減衰の算出

LC 共振回路へ 100V の電圧を印加している状態で、電源を切り離した場合の減衰の様子と理論値との比較を図 11 に示す。

図 11 より最初は 0.166Ω の減衰特性の理論値と実験結果が一致しているが、時間が経つにつれて理論値の減衰特性と実験結果にズレが生じているのが見て取れる。実験結果からは時間が経つにつれて減衰が穏やかになること、すなわち抵抗が減っている事が見て取れる。

図 11 における第一サイクルのピークから第二サイクルのピークまでの電圧(電流)変化は $136.0V \rightarrow 126.7V$ ($18.4A \rightarrow 17.1A$) である。よって、この間におけるエネルギーの減衰量は $\Delta J = 0.514J$ 、時間は $\Delta t = 0.0197s$ であったので、その時の損失は、 $W = \Delta J / \Delta t = 0.514 / 0.0197 = 26.09 \approx \Delta 26.1W$ と見られる。

一方、前述のように第一サイクルでの内部抵抗は 0.166Ω と算出されているが、この値と第一サイクルの電流の平均実効値 $12.53A$ とから消費電力を求めると、 $W = rI^2 = 0.166 \times 12.53^2 = 26.06 \approx 26.1W$ となり、LC 並列共振回路の減衰結果から求めた損失と理論式が導き出した損失は、ほぼ一致した。すなわち、100V 印加時には LC 共振回路内に 26W 程度の損失が発生していることが判った。

次に図 11 と同じ要領で、印加電圧を 50V にした時の結果を図 12 に、10V にした時の結果を図 13 に示す。

図 12 より、印加電圧が 50V の時は電源を切り離した直後の共振回路内の減衰特性と時間が経過した後の減衰特性には差が出てくることから、電流が大きい状態での減衰率と小さい状態での減衰率には違いがあることが判る。

しかし、図 13 より、印加電圧が 10V ($I = 1.35A$) の時は電源を切り離してから時間が経過しても、実験結果と理論値に変化は見られない。これから、 0.05Ω 程度が LC

共振回路内に存在する接触抵抗などであり、10V 以上に印加電圧を大きくすると超電導コイルの交流損失が顕著になると考えられる。

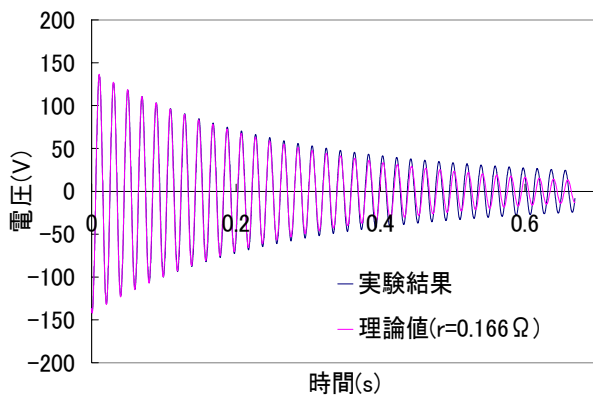


図 11 LC 共振回路減衰結果と理論値の比較
(無負荷 印加電圧 100V)

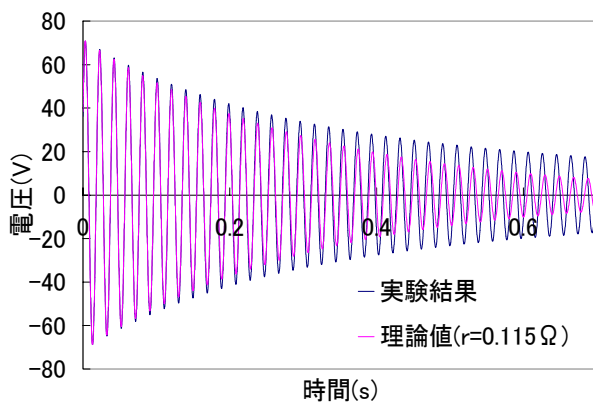


図 12 LC 共振回路減衰結果と理論値の比較
(無負荷 印加電圧 50V)

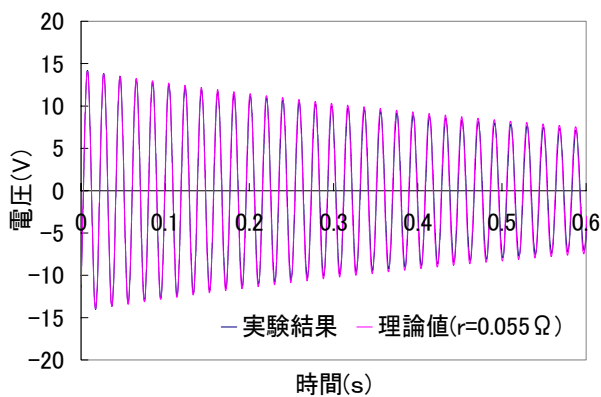


図 13 LC 共振回路減衰結果と理論値の比較
(無負荷 印加電圧 10V)

4. 3 液体窒素蒸発法を用いた交流損失の測定

超電導コイルからどの程度の損失が発生しているのかを確認するため、液体窒素蒸発法を用い交流損失の測定を行なった。蒸発法は図 14 の回路で行なった。

試料となる超電導コイルを、そこから発生する全ての気体を回収できるような上部に穴の開いている低温用ガラス容器(図 15)で覆い、それらを液体窒素中に完全に浸漬した。そして、その蒸発した気体を一定温度の水に浸した銅パイプ(3m 長)に通し、ガス流量計で蒸発量の測定をした。

なお、コイルでの蒸発量を損失に換算するために、ヒーターで既知の熱入力を入れたときの蒸発量を求め、そのデータよりコイルの蒸発量と損失との較正曲線を求めた。

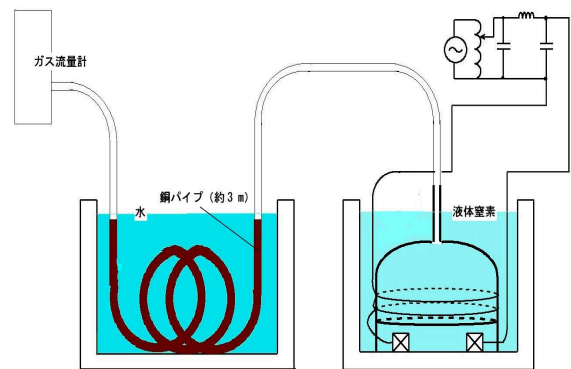


図 14 蒸発法の測定回路



図 15 低温用ガラス容器

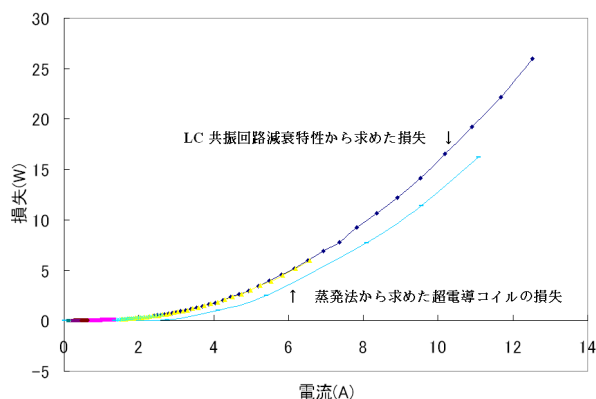


図 16 蒸発法から求めた超電導コイルの交流損失

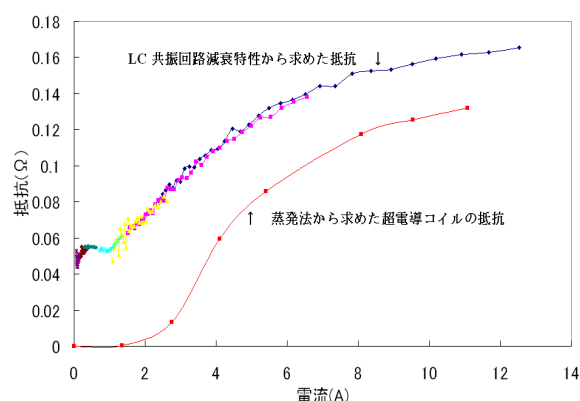


図 17 交流電による超電導コイルの抵抗値

蒸発法により求めたコイルの損失値および抵抗値を図 16 および図 17 に示す。なお、同図には、考察 4.2 で LC 共振回路のエネルギー減衰結果から求めた損失および抵抗も示してある。

そして図 17 より、0A から 1.4A 付近までは超電導コイルの損失はほとんど見受けられず、LC 共振回路には約 0.05Ω の一定の抵抗が見受けられることが判る。これは、常温部の導線および接触抵抗が主だと思われる。しかし、3A 以上になると、超電導コイル自体にも無視できない程の損失が発生している事が見て取れる。

5. 電力用コンデンサの低温特性

近年、絶縁の為に窒素ガスを封入した窒素形電力用コンデンサが登場している(図 18)。もし電力用コンデンサの低温下での使用が出来るのであれば、本 LC 共振回路を全て低温中で使用することが可能になる。これにより、接触抵抗や超電導コイルとコンデンサをつなぐ電流リードでの損失、および常温部からの熱侵入の大幅な低減が可能になる。さらに、将来電力系統に超電導機器が導入



図 18 窒素形電力用コンデンサ

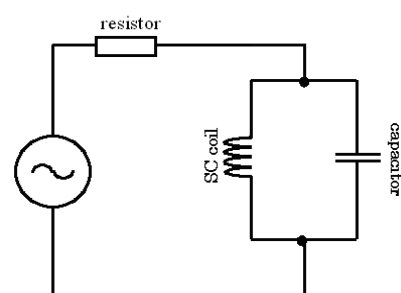


図 19 電力用コンデンサの低温特性測定回路

された際には、コンデンサの低温使用など他方面にわたる応用も考えられる。このような背景の下で電力用コンデンサの低温特性実験を行なった。

コンデンサの低温特性の測定は、図 19 の回路を用いて LC 共振回路の Q 値を求める事により行った。Q 値の測定は以下の 2 通りである。

- ・図 19 における超電導コイル部分のみ冷却
 - ・図 19 における超電導コイルとコンデンサ部分を冷却
- いずれの場合もリード線部分は常温部に保持し、あくまでもコンデンサ部分のみの冷却による特性変化を測定した。このようにして、コンデンサの低温特性を測定した結果を図 20 に示す。

図 20 より、Q 値はコンデンサが常温の時は 91 であったのに対し、コンデンサを低温にする事により 130 に上がったことが確認できた。

次に、コンデンサの容量は、常温中では $10.388\mu\text{F}$ であったが、低温中では $9.942\mu\text{F}$ になった。すなわち、液体窒素に浸すことによりコンデンサの容量は約 4%減った。この理由として、液体窒素にコンデンサを浸すことによる熱収縮により、コンデンサの電極面積が減少した可能性が考えられる。

本コンデンサを液体窒素中で使用した後、常温に戻したが外見に変化は見られなかった。図 20 の実験結果は常温→低温→常温のサイクルを 10 回繰り返した結果の Q 値特性のまとめであるが、その特性にはほとんど変化は無く再現性があることが見て取れる。また、繰り返し冷却試験後のコンデンサの外見、容量等の特性の変化は全く見られなかった。

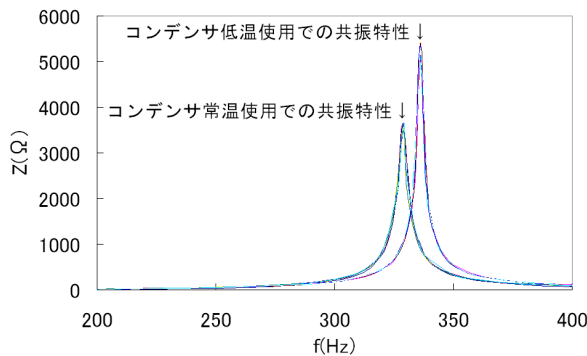


図 20 窒素形電力用コンデンサの低温特性

6. 結 論

小規模な実験ではあるが、本装置を用いた模擬電力系統において、瞬時電圧低下および負荷急変時の負荷側の電圧変動の抑制が可能な事を確認した。本装置は、何らの検出装置を必要とせず、変換器を介さず、単純に超電導コイルとコンデンサを系統に並列に接続するだけで、電圧補償が可能である。しかし、超電導コイル内での交流損失による内部抵抗が無視できず、瞬低保障装置として現状のままでは実用化できるという所までは至っていない。

本テーマにおける主要な技術的問題は、超電導コイルの交流損失の抑制である。本装置では超電導コイルの交流損失は無視する事が出来無いが、第二世代の HTS 導体を導入すれば、この問題を解決できると期待する。

加えて電力用コンデンサの低温使用が可能になれば、超電導コイルとコンデンサを一体として装置全体を低温下で使えるため、一層の高効率化が可能になると考えられる。

なお、今回窒素封入型の電力用コンデンサを液体窒素に浸すことによる低温でのコンデンサの特性について調べた。その結果、容量については約 4%低減したが、Q 値に関してはかなりの向上が見られ、繰り返しの熱サイクルによる劣化はなく、十分低温で使用できることが判った。

また、電極や内部リード線に超電導材料を用いることにより、超電導コンデンサを実現する可能性も考えられる。

今後、コンデンサの低温時での絶縁性能などの面でクリアできれば、将来電力用コンデンサを低温で使うこと、あるいは超電導コンデンサの導入による更なる高性能化の可能性が期待できる。

参考文献

- (1) T. Ishigohka, H. Shimoji, S. Nishimiya, A. Ninomiya, “ Possibility of AC-SMES utilizing LC Resonance of SC coil and Capacitor ”, *Abstracts of Cryogenic Society of Japan Conference, Paper No.1C-p07, p.74, May 2006.*
- (2) S. Kawashima, T. Ishigohka, A. Ninomiya, “Power System Voltage Stabilizer using Parallel Resonance Circuit with HTS Coil and Capacitor”*IEEEJ Paper E201-C1 5_035, March 2007.*
- (3) S. Nagaya, N. Hirano, H. Moriguchi, H. Nakabayashi, S. Hanai, J. Inagaki, S. Ioka, “ Field Test Result of the 5MVA System Bridging Instantaneous Voltage Dips” *IEEE Trans ,Superconductivity ,vol 16 , No.2 ,2006.*
- (4) S. Nomura, H. Tsutsui, Shunji Tsuji-Iio, and R. Shimada, “ Flexible Power Interconnection With SMES” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity, vol.16 , No.2 , 2006.*