

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検討

川嶋 忍^{*1}, 石郷岡 猛^{*2}, ニノ宮 晃^{*3}

Power System Voltage Stabilizer using LC Resonance Circuit with Superconducting Coil and Capacitor

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

ABSTRACT : In late years the development of a device guaranteeing the voltage in the case of a instantaneous voltage dip is demanded. And, in this article, I suggest a voltage security device of the new type which using LC resonance circuit with superconducting coil and capacitor. This power system voltage stabilizer detects a instantaneous voltage dip and a voltage change by a thing of a load sudden change automatically and can hope that I guarantee the voltage during several cycles. Furthermore, this device incorporates it in load and can expect movement of the repetition. In this study, I demonstrated the effect of this device.

Keywords : instantaneous voltage dip, LC resonance circuit, superconducting coil

(Received September 25, 2007)

1. はじめに

近年、半導体や精密機械の製造ラインなど極めて高い品質を要求される工場において、瞬時電圧低下（瞬低）により電気機器が誤作動もしくは停止する影響を防ぐ装置の開発が求められている。半導体工場や情報産業等では、落雷などによる数ms～数十msの電圧低下ですら大きな悪影響を受け、それにより工場が停止すれば、数億円規模の損失が発生する可能性があると言われてている。このため、瞬時的な電圧の変化を抑制する装置の開発が求められているのである。

本研究では交直変換器の代わりに超電導コイルとコンデンサで構成されるLC並列共振を利用した、新しいタイプの電圧安定化装置を提案する。本装置は、機械的な外部制御を必要とせず受動的に動作し、時間遅れなしで繰り返し動作が期待できる。

また、この装置を組み込む事により、負荷急変が起きた際の電圧変動の抑制も試みた。本研究ではこのLC並列共振回路を用いた、系統電圧の安定化装置の可能性という視点で研究を行った。

2. 原理

本研究ではBi-2223/Agを使用した高温超電導コイルを用いる。これは液体窒素中(沸点77K)で超電導状態になる。この超電導コイルとコンデンサを互いに並列に接続し共振状態にすると、磁気エネルギーと静電エネルギーの2つの状態でエネルギーが蓄えられる。超電導コイルを用いれば交流損を除いて抵抗がないので、理論的にはこのLC共振回路に蓄えられるエネルギーの減衰時定数は極めて長い。

図1に本方式の原理を示す。このLC共振回路にはエネルギー蓄積能力があるので、本装置を負荷端に設置すれば、瞬時電圧低下などによる電源変動や、負荷の急変に伴う系統電圧の変化を抑制する事が出来るのではないかとこの考えに基づいている。

*1 : 大学院電気電子工学専攻博士前期過程

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

(Professor, Dept. of Electrical and Mechanical engineering)

*3 : 電気電子工学専攻助手

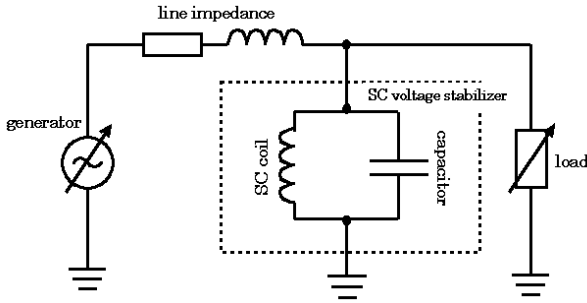


図1 LC共振回路を用いた電圧安定化装置の原理図

3. 実験方法

3.1 実験装置

表1と図2に、実験に使用した高温超電導コイルの仕様値と写真を示す。

表1 高温超電導コイルの仕様値

wire	Bi-2223/Ag tape
outer diameter	190mm
inner diameter	120mm
height	46mm
number of turns	360
critical current	48A
inductance	23.2mH

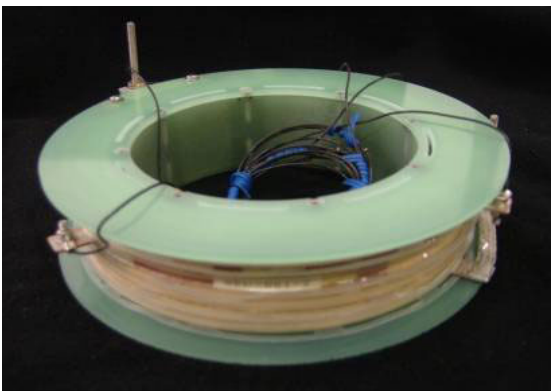


図2 高温超電導コイル

3.2 本実験

実験は図3及び図5の2通りの回路で行い、それぞれの実験回路における本装置の特性を観測する。尚、図3は電源を切り離すことによる瞬時電圧低下の再現回路、図4は負荷急変再現回路である。

超電導コイルのインダクタンスは23.2mH、コンデンサのキャパシタンスは418.37 μ Fである。これより、共振周

波数は約50Hzである。

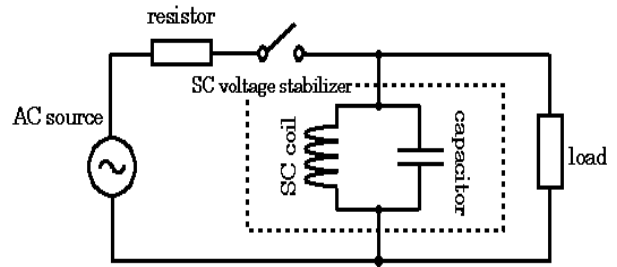


図3 瞬時電圧低下再現実験回路（電源切り離し）

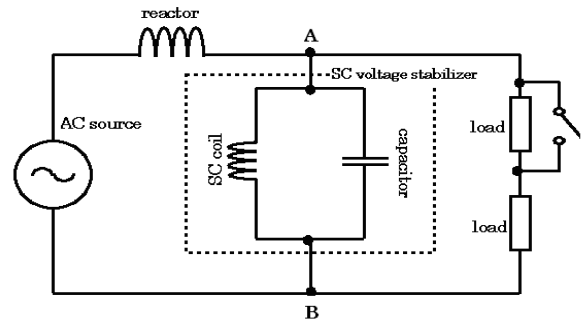


図4 負荷急変再現実験回路

4. 実験結果

4.1 LC共振回路の共振特性と減衰特性

まず、予備実験として超電導コイルLC共振回路の共振特性を観測した。前述のように、超電導コイルのインダクタンスは23.2mH、コンデンサのキャパシタンスは418.37 μ F、超電導コイルにかかる電圧を50Vとした時の結果を図5として示す。同図から、共振周波数は50.8Hz、Q値は33.9であった。

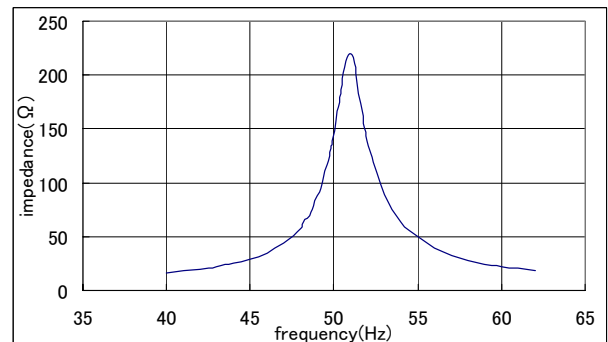


図5 共振特性

4. 2 瞬時電圧低下再現実験結果

図3の回路で負荷を ∞ にして、電源を回路から切り離れた時の結果を図6として示す。同図より、LC並列共振回路内に内部抵抗が発生している事が分かる。

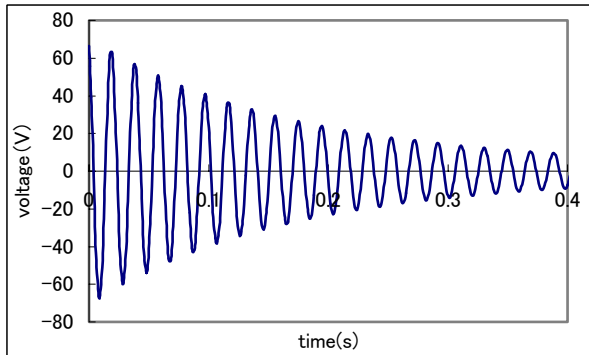


図6 LC共振回路減衰特性

そして、図3の回路で負荷を 200Ω とし、電源を切り離れた時の結果を図7として示す。同図より3サイクル目の電圧最大値は電源切り離し前に比べると、40.0%減であった。

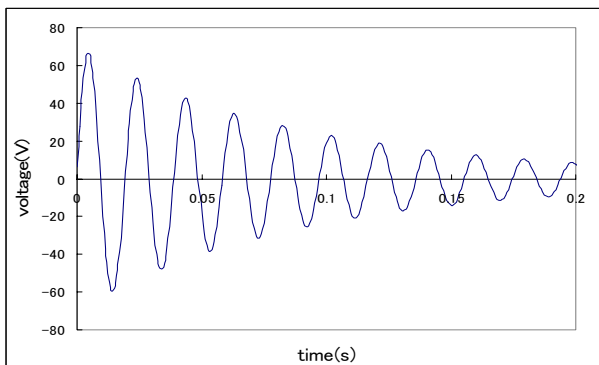


図7 負荷 200Ω 時の減衰特性

4. 3 交流損による内部抵抗値の算出

ここでLC共振回路の内部損失が、どの程度のものであるか、そしてそれは本装置の特性にどの程度の影響を及ぼしているかを理論値より考察する。図8の回路でスイッチをあるタイミングで開いた時、負荷端電圧の減衰特性を理論値と比較する。尚、LC並列共振回路内に交流損があるため、超電導コイルに抵抗 r をおいた。

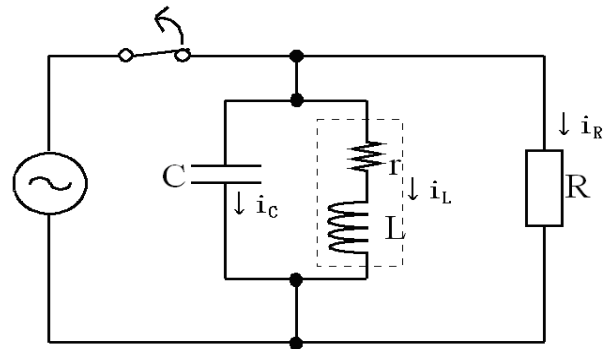


図8 理論値算出

この回路から算出した、電源切り離し後の負荷にかかる電圧 v_R は次の式で表される。

$$v_R = e^{-\left(\frac{r}{2L} + \frac{1}{2CR}\right)t} \left[\begin{array}{l} V_m \cos\theta \cos\omega t + \\ \left\{ \frac{2CV_m \cos\theta \left(\frac{r}{L} - \frac{1}{CR}\right)}{4C\omega} + \sqrt{\frac{C}{L}} V_m \sin\theta \right. \\ \left. \left(\frac{2r}{R} - \frac{r^2 C}{L} - \frac{L}{R^2 C} - 4LC\omega^2 \right) \right\} \sin\omega t \end{array} \right]$$

但し、電源を切り離れた時の電源の位相は $\cos\theta$ 、

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{LC} + \frac{r}{LCR}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{r}{L} + \frac{1}{CR}\right)^2}$$

である。

そして、これらの結果から理論値を実測値に当てはめたものが、図9である。理論値の内部抵抗の値を 0.23Ω とした時に実測値とほぼ一致した。

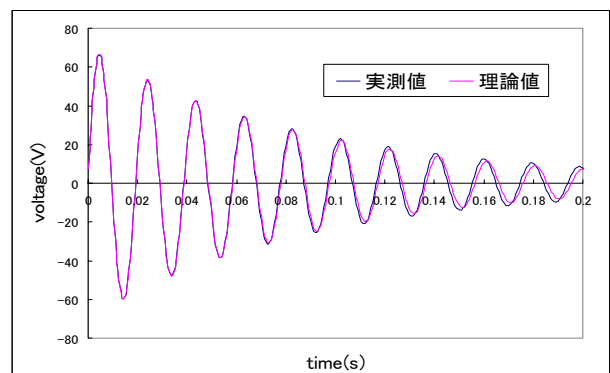


図9 理論値から内部抵抗値の算出

そして、図10にLC並列共振回路内の内部抵抗が0だった時の理論値を示す。同図より、スイッチ切り離し後3サイクル目の電圧最大値はスイッチ切り離し前と比べると、23.6%減であった。これより、内部抵抗の存在はLC

並列共振回路にとって無視できないものであると言える。

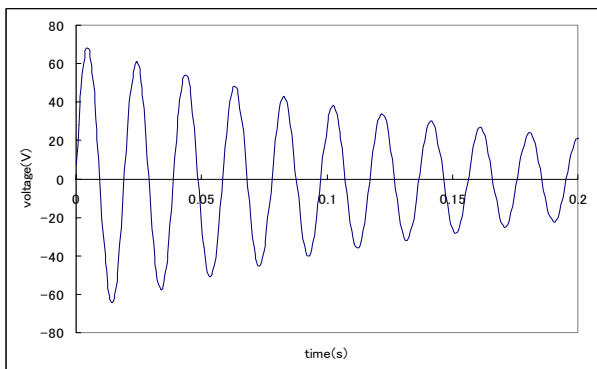


図10 内部抵抗を0とした時の電圧特性

4. 4 負荷急変再現実験結果

図4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（AB間の電圧）の電圧変動を観測した。そして、その結果を安定化装置がない場合と比較した。図11に安定化装置がある場合の負荷端電圧の変化を、図12に安定化装置がない場合の負荷端電圧の変化をそれぞれ示す。

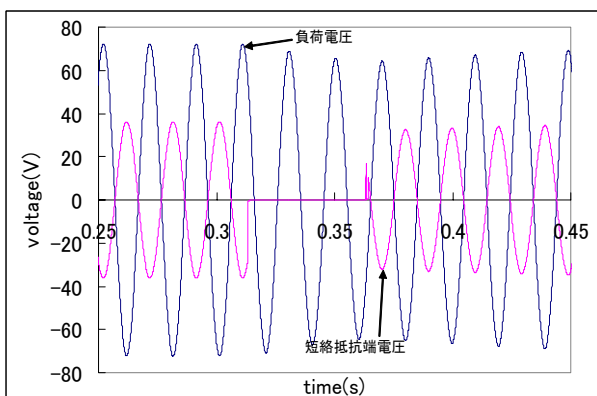


図11 電圧変動特性（安定化装置あり）

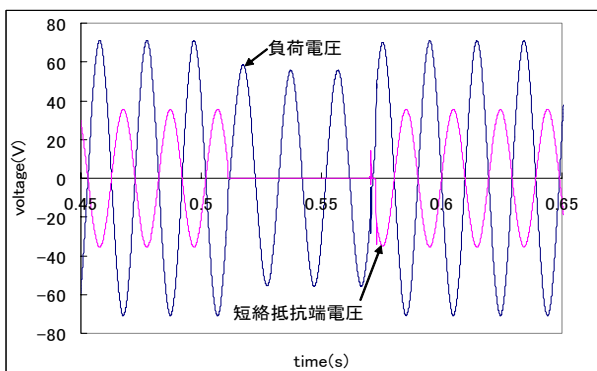


図12 電圧変動特性（安定化装置なし）

図11及び図12から、本安定化装置がある場合は、負荷端電圧の変動が抑制され、定常電圧の瞬時電圧低下は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12.4%であるのに対し、本安定化装置が無いと負荷短絡直後に21.9%も減衰してしまっている。

5. むすび及び今後の展望

以上、小規模な実験ではあるが高温超伝導コイルとコンデンサの並列共振回路を構成し、それを模擬電力系統に挿入して、瞬時電圧低下及び負荷急変時の負荷側の電圧変動が抑制される事を確認した。本装置は何ら変換器を介さず、単純に超伝導コイルとコンデンサを系統に並列に接続することで、瞬時電圧低下及び負荷急変時の負荷電圧の変化を抑制する事が可能である。

しかし、瞬低再現回路の実験結果より、超伝導コイル内で交流損による内部抵抗が無視できず、瞬時電圧低下保障装置として、このままでは実用化できるという所までは至っていないが、今後交流損の低減に成功すれば実用化が可能であると思われる。

負荷急変に関しては、本安定化装置があると負荷端の電圧変動の抑制効果が、十分にある事を実験的に確認した。さらに、負荷急増の際、電源からの供給電流の急増もかなり抑えることができる。

交流損の低減などまだまだ課題はあるが、今後も更なる検討や実規模構成とその概念設計を行い、実用化への道筋を探っていきたい。

参考文献

- 1) 石郷岡 猛, 下地 広昭, 西宮 幸希夫, ニノ宮 晃, 「超伝導コイルとコンデンサのLC共振を利用した交流型SMESの可能性」, 第74回2006年度春期低温工学・超伝導学会講演概要集
- 2) 川嶋 忍, 石郷岡 猛, ニノ宮 晃, 「高温超伝導コイルとコンデンサの並列共振回路を用いた系統電圧安定化装置」, 平成19年電気学会全国大会講演論文集