

第2章 瞬時電圧低下補償用 SMES 開発

2. 1 まえがき

「1. 2. 1 瞬時電圧低下対策の現状」で前述したように、大規模な半導体工場やデータセンター等においては瞬低による甚大な被害が発生している。図 2-1 に示すように、瞬低に対しては個別負荷単位の補償ではなく、工場バンク単位の一括補償への要請が強く、MW 級の大容量瞬低補償が技術課題となっていた[1]。SMES は「1. 3 超電導電力貯蔵システム(SMES)の概要」で前述した数多くの特徴の中でも、瞬時大出力が可能で大容量になるほど優位性が高くなるという大容量瞬低補償装置に最適な特長を有する。

今回、最新鋭の大型液晶・TV 工場の建設に伴い、具体的に大容量瞬低補償装置を実現する必要が生じたが、SMES はこれまで要素技術としての技術開発は進められてきたものの、国内での導入実績はなく、実用化技術の確立が急務であった。そこで、従来の金属系超電導線材を用いて実用化技術の確立を図り、瞬低補償用 SMES システムを開発した。

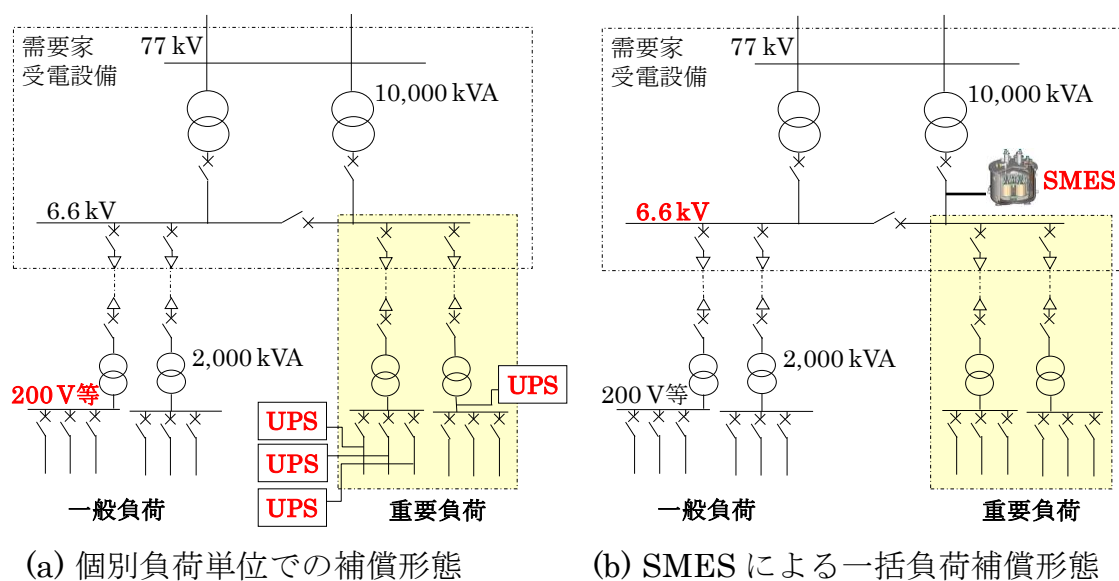


図 2-1 半導体工場等における瞬低補償対象負荷の範囲

本章では、初めに電力貯蔵部としての SMES コイルの設計・製作・評価、次に瞬低補償装置としての SMES システムの設計・製作、その後の SMES システムの模擬負荷試験、実負荷模擬瞬低試験、および実フィールド試験の結果について述べ、さらに、これらの知見から SMES 特性を改善した結果について述べる。

2. 2 瞬低補償用 SMES の開発コンセプト

工場設備として高効率・コンパクト・メンテナンスフリー等の要求仕様を満足するために、瞬低補償用 SMES システムは以下のコンセプトで設計した[2]。

- ・ 工場重要負荷を瞬低から一括補償するため、大出力化
- ・ 大出力実現のため、超電導コイルの大電流化および高耐電圧化
- ・ コンパクト化・漏洩磁界低減のため、4 極コイルの交互配置
- ・ コイル内熱侵入低減のため、高温超電導体による電流リード接続およびコイル中間電圧を接地
- ・ 待機ロス低減のため、高速切換が容易な常時インバータ給電方式ではなく、常時商用給電方式を採用
- ・ 変換器ロス低減のため、出力と独立した高効率充電回路を採用
- ・ 高速切換実現のため、高速瞬低検出方式および高速強制遮断方式を採用
- ・ 簡便な運用・保守実現のため、小型冷凍機の組み合わせ

2. 3 5MW-5MJ SMES 用コイル開発

2. 3. 1 SMES コイルの設計・製作

前述の設計コンセプトをもとに、瞬低補償対象となる工場の重要負荷の当初容量に合わせて出力容量を 5 MW、瞬低継続時間の実態に合わせて補償時間を

最長 1 s とする瞬低補償 SMES 用の超電導コイル (利用可能エネルギー: 5 MJ) の設計・製作を実施した。

(1) 超電導コイルシステム

SMES の大出力容量を実現するには、超電導コイルの大電流容量化ならびに高耐電圧化の両立が必要となる。超電導コイル設計の流れとして、出力容量 5 MW を確保するため、コイルの最小電流と定格電圧を決定し、出力時間 1 s (利用可能エネルギー 5 MJ 以上) を確保するため、コイルのインダクタンスと定格 (最大) 電流を決定し、出力時およびコイル保護遮断時に発生する最高電圧を考慮して耐電圧を決定することとした。

超電導コイルの絶縁設計においては、耐電圧を高く設定するとコイルの冷却性能が十分に確保できず、クエンチに至る可能性が高くなる。このため、絶縁材料の耐電圧特性と冷却特性を考慮して、液体ヘリウムを用いた浸漬冷却型超電導コイルとして製作メーカーで実績のある最高値 2.5 kV を今回製作するコイルの定格電圧に設定した。ただし、コイルの耐電圧は JEC-2120(2000)を準用し、6 kV に設計した。ここで、図 2-2 に示すようにコイル中点を抵抗接地する方法を採用することで、コイル電圧は実質 2 倍とみなすことができ、同出力容量で最小電流を 1/2 へ低減可能とした。コイル最小電流値 I_{\min} は、効率を 95 % とすると、式(2-1)より 1.05 kA 必要となる。

$$I_{\min} = 5 \text{ MW} / (V \times 2 \times 0.95) \dots \dots \dots (2-1)$$

ただし、 V : コイル定格電圧 2.5 kV

利用可能エネルギー E_u (MJ) は、系統再連系時の並列同期時間 t_1 を 0.12 s、効率を 95 %、設計裕度を 5 % とすると、式(2-2)より 6.19 MJ 必要となる。

$$E_u = 5 \text{ MW} / 0.95 \times (1 + t_1) \times 1.05 \dots \dots \dots (2-2)$$

コイルのインダクタンス L およびコイルの最大電流値 I_{\max} は、後述のコイル導

体および形状等を考慮して、式(2-3)より L を 2.08 H、 I_{\max} を 2.66 kA と決定した。

$$E_u = L(I_{\max}^2 - I_{\min}^2) / 2 \dots \dots \dots (2-3)$$

この結果、最大貯蔵エネルギーは 7.34 MJ となる。

コイルの保護抵抗値 R は、コイル遮断時の最高電圧が定格電圧値を上回らないようにするため、設計裕度を 5 % とし、式(2-4)より 0.89 Ω と決定した。

$$R = V / I_{\max} \times 0.95 \dots \dots \dots (2-4)$$

以上より算出したコイル主要諸元に基づき、出力 5 MW、利用可能エネルギー 5 MJ の瞬低補償 SMES コイル用超電導導体を設計した。その超電導導体構造を図 2-3 に示す。瞬低補償用 SMES のようなパルスコイルの超電導導体設計においては、充放電時に電流変化に応じた交流損失（銅損失、ヒステリシス損失および結合損失）が発生するため、電流容量の確保とともに交流損失の低減を考慮する必要がある。導体の素線には、温度安定性向上・交流損失低減のため、安定化 Cu で被覆され、比較的高抵抗の CuNi で被覆された直径 ϕ 13.5 μm の NbTi フィラメントをツイストした直径 0.9 mm の実用素線を用いた。

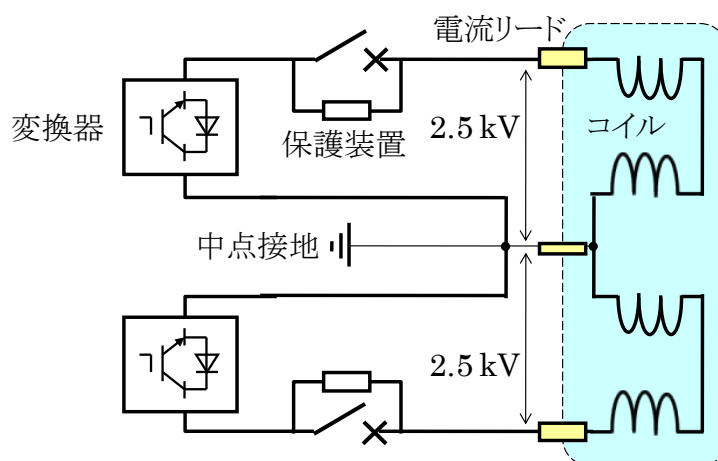


図 2-2 5 MW SMES コイル（直流側）の主回路結線図

コイルに必要な定格電流値は 2.66 kA であり、コイルの最高経験磁界 5.3 T、コイル冷却に用いる液体ヘリウム温度 4.2 K、コイルの温度マージン、経済性等を考慮し、導体の I_c を同条件において 7.9 kA とした。この導体を実現するため、上記 NbTi 素線を 27 本ラザフォード撚りした超電導導体を定格電流 2.66 kA の SMES コイルに採用した。ラザフォード撚りにすることで任意の素線本数で必要容量の電流値が確保できるとともに任意の撚りピッチで結合損失の時定数を制御することができる。超電導導体の主要諸元を表 2-1 にまとめる。

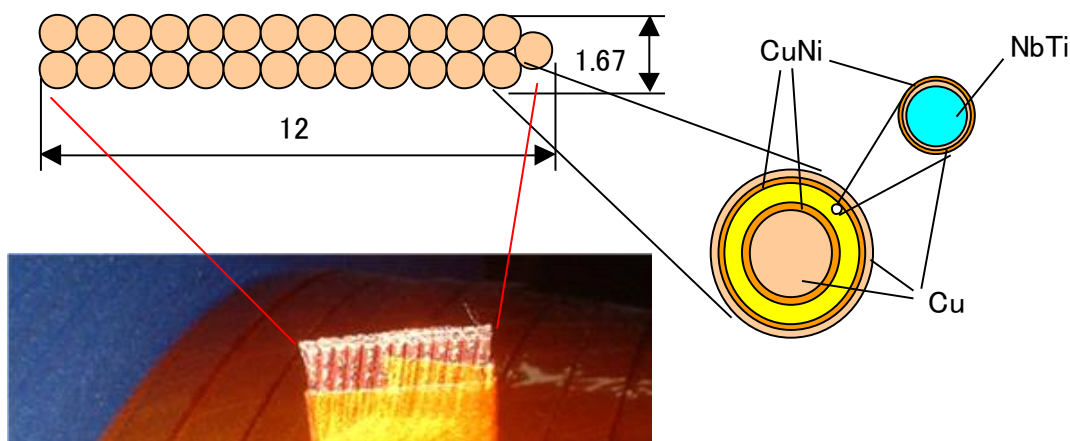


図 2-3 瞬低補償 SMES コイル用 NbTi ラザフォード導体の断面構造

表 2-1 瞬低補償 SMES コイル用 NbTi ラザフォード導体の主要諸元

超電導線材	NbTi	
素線直径	0.9	mm
Cu/ CuNi /NbTi	2.55/ 1.45/ 1	
フィラメント直径	13.5	μm
フィラメントツイストピッチ	11 ± 2	mm
RRR	> 200	
導体寸法	1.67×12.0	mm
素線数	27	
素線ツイストピッチ	120	mm
$I_c @ 5.3\text{T}, 4.2\text{K}$	7.9	kA

RRR: 残留抵抗比 (常温と液体ヘリウム温度での抵抗比)

SMES コイル諸元は後述するが、そのコイルのロードラインを図 2-4 に示す。定格運転時のコイル I_c は 7.9 kA で定格電流の 3 倍と大きいですが、定格運転時の臨界温度は 6.0 K であり、温度マージンは 1.8 K と極めて小さい。このため、コイル充放電による交流損失が発生する場合でもコイル温度上昇がこの範囲に収まるように、交流損失の発生を抑える導体構成とした。ただし、今回の SMES は瞬低補償用途であり、コイルの交流損失は瞬低補償時に最大となり、クエンチの可能性が最も高いが、この時、エネルギーを外部へ放出するため、保護動作時と同様の役割を果たしている。このため、万一、瞬低補償時にコイルがクエンチした場合においても瞬低補償動作完了後に遮断するシーケンスとすることで交流損失に対するマージンを低く抑えることを可能とした。

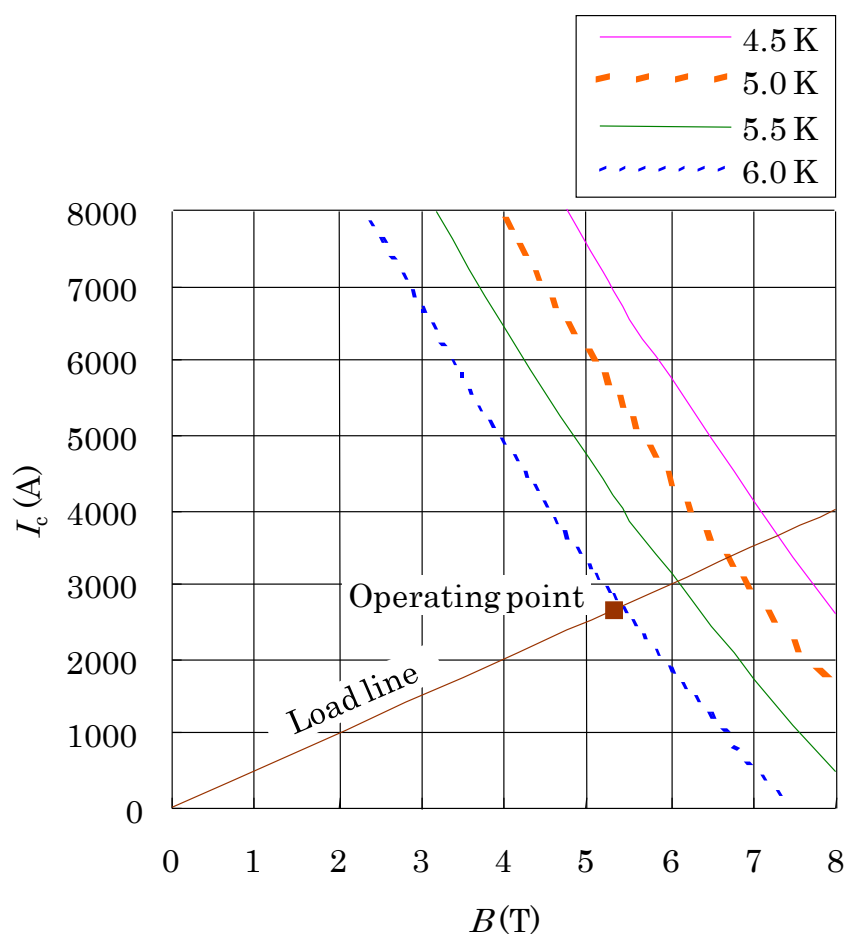


図 2-4 5 MW-5 MJ SMES コイルのロードライン

SMES システムは、超電導コイルに電流を流し続けることでエネルギーを貯蔵するため、コイル周辺には一定の磁界が常に発生している。50 ガウス以上の磁界中では他の電気・電子機器類が誤動作する可能性が知られており、システム全体をコンパクトにまとめるためには、この磁界が漏洩する範囲を低減させる必要がある。また、製作後の SMES 運搬を考えると、特認手続きを実施した場合でも輸送制限から幅 3.2 m 以下にクライオスタットの外形（直径）を抑える必要がある。コイルのコンパクト化および漏れ磁場低減の方法として、マルチポール配置が提案されている[3]。そこで、今回の SMES に必要な 7.34 MJ のエネルギーを貯蔵する場合のコイル形状・配置による磁界分布を比較評価した。5 ガウス磁界領域を図 2-5 に示す。4 個のソレノイドコイルを隣接するコイルの磁極の向きを反転させる配置（4 極ソレノイド対極配置）により、5 ガウス領域面積を 1/5 以下とすることができる。今回、この配置を採用することで、5 ガウスの漏洩磁界を直径 8 m 以下に抑制することができた。

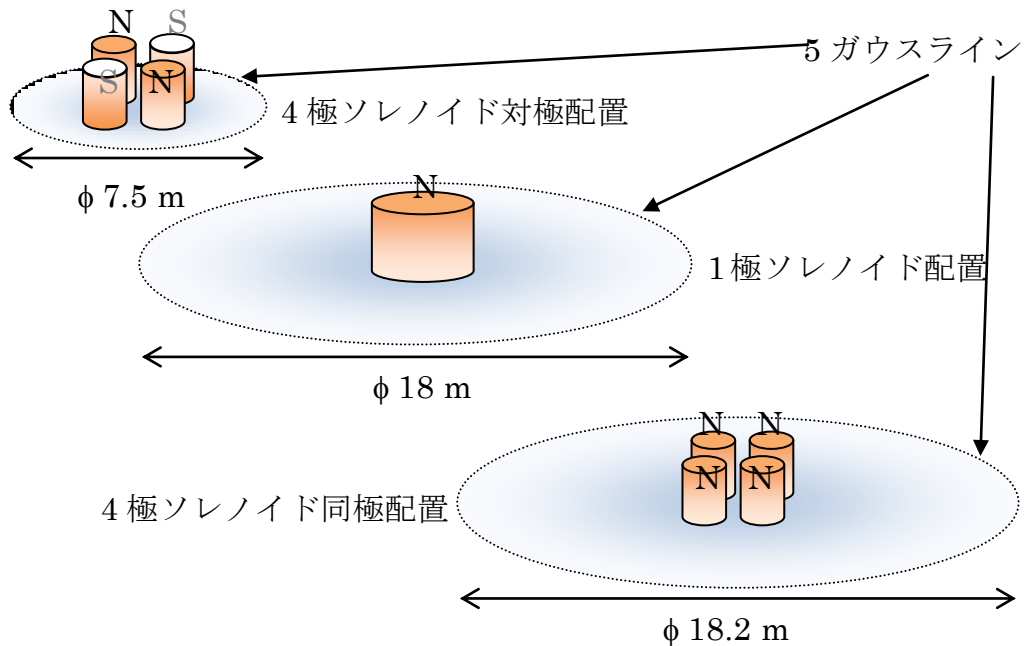


図 2-5 エネルギー同容量コイルの形状・配置による漏洩磁界比較

以上の検討結果から決定した 5 MW-5 MJ 瞬低補償用 SMES コイルの設計諸元を表 2-2 にまとめ、製作した 4 極ソレノイド対極配置のコイル外観を図 2-6 に示す。なお、4 極コイルの結線は図 2-2 に示すとおりである。

表 2-2 5 MW-5 MJ 瞬低補償用 SMES コイル設計諸元

導体種類	NbTi ラザフォード導体
導体総長	9.1 km
コイル単体形状	密巻ソレノイド
コイル単体内径	0.530 m
コイル単体外径	0.648 m
コイル単体高さ	0.700 m
コイル全体配置	4 極ソレノイド対極配置
定格電流	DC 2.66 kA
定格電圧	DC 2.50 kV
耐電圧	DC 6 kV
インダクタンス	2.08 H
貯蔵エネルギー	7.34 MJ
利用可能エネルギー	5.00 MJ
最高磁界	5.3 T

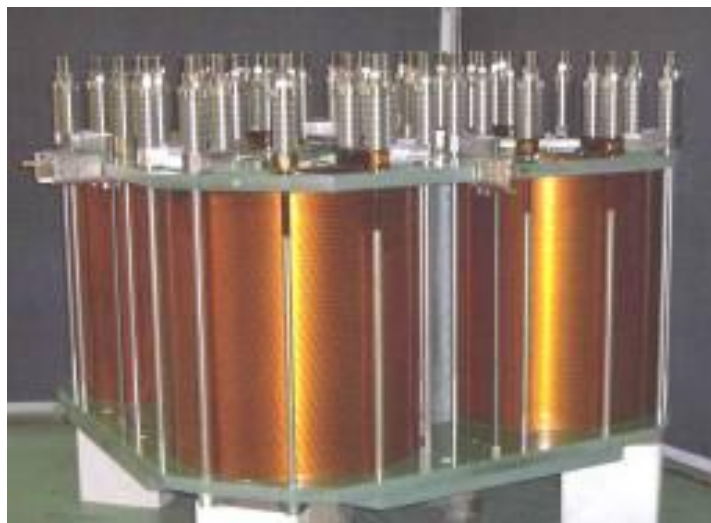


図 2-6 5 MW-5 MJ 瞬低補償用 SMES コイル外観

(2) 高温超電導電流リード

大出力 5 MW 等を実現するため、高温超電導電流リードにおいてもコイルと同様に定格電流 2.66 kA、耐電圧 6 kV が要求される。これらの要求仕様、77 K クラス、0.5 T クラスの設置環境、および信頼性を考慮し、1 kA 級 YBCO 超電導電流リードを 4 本並列接続して用いた。図 2-7 にクライオスタット貫通部の高温超電導電流リードの構造図を示す。4 本の電流リードはギフォード・マクマホン式（以下、GM という）冷凍機で 4 面から窒化アルミ (AlN) 板を介して 77 K 以下に冷却した。高い熱伝導率と高い耐電圧を両立する AlN 板を耐電圧に必要な厚さ採用することで、高温超電導電流リードと GM 冷凍機間で耐電圧 6 kV を満足するとともに、通電時に 4.2 K から 77 K への熱侵入量が 1 本当たり 0.38 W 以下の超電導電流リードを用いることで、外部からの熱侵入を 3 W 以下に抑制可能としている。なお、図 2-2 に示したように、コイル中点を接地し、電流を打ち消し合わせる方法を採用したことで、コイル中点の電流リードは 1 本で実現可能とした。

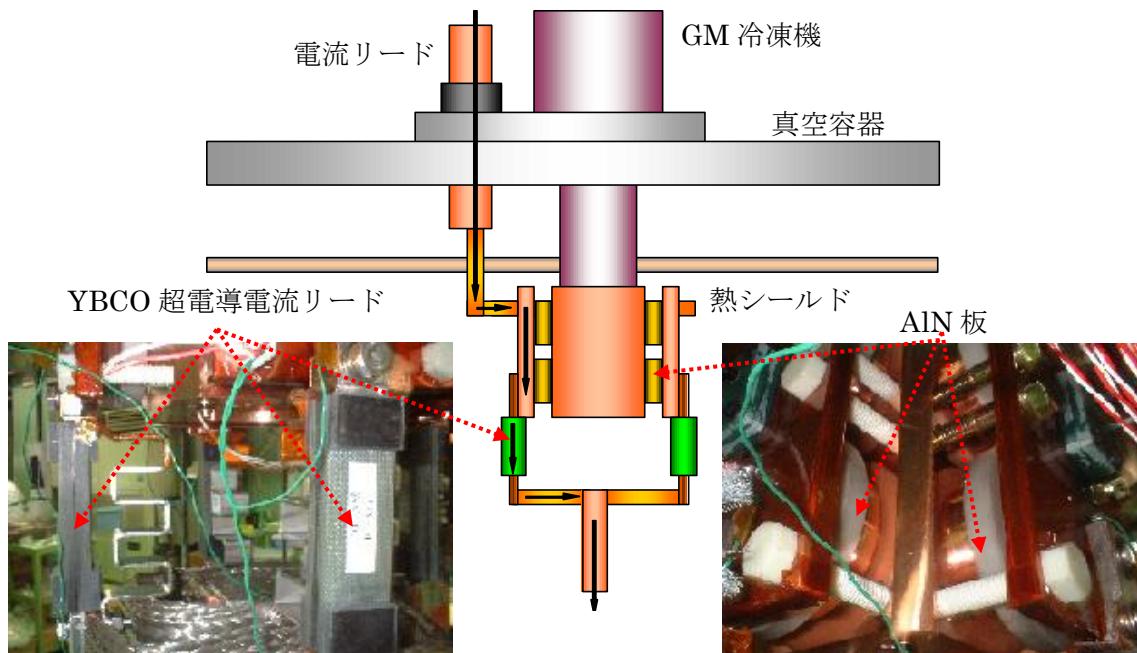


図 2-7 高温超電導電流リード構造図

(3) クライオスタット

コイルの冷却方法に関しては、金属系超電導の冷却に一般的に採用されている液体ヘリウム浸漬冷却によりコイルを 4.2 K に冷却した。吸熱により気化したヘリウムガスの再凝縮には、3 冷凍トン未満の小型冷凍機を複数組み合わせることで、高圧ガス保安法の適用対象外とし、法定管理者を不要とし、保守や点検・交換の簡素化を実現した。これまでの検討結果により決定した SMES 内部構造の鳥瞰図を図 2-8 に、製作した SMES の外観を図 2-9 に示す。

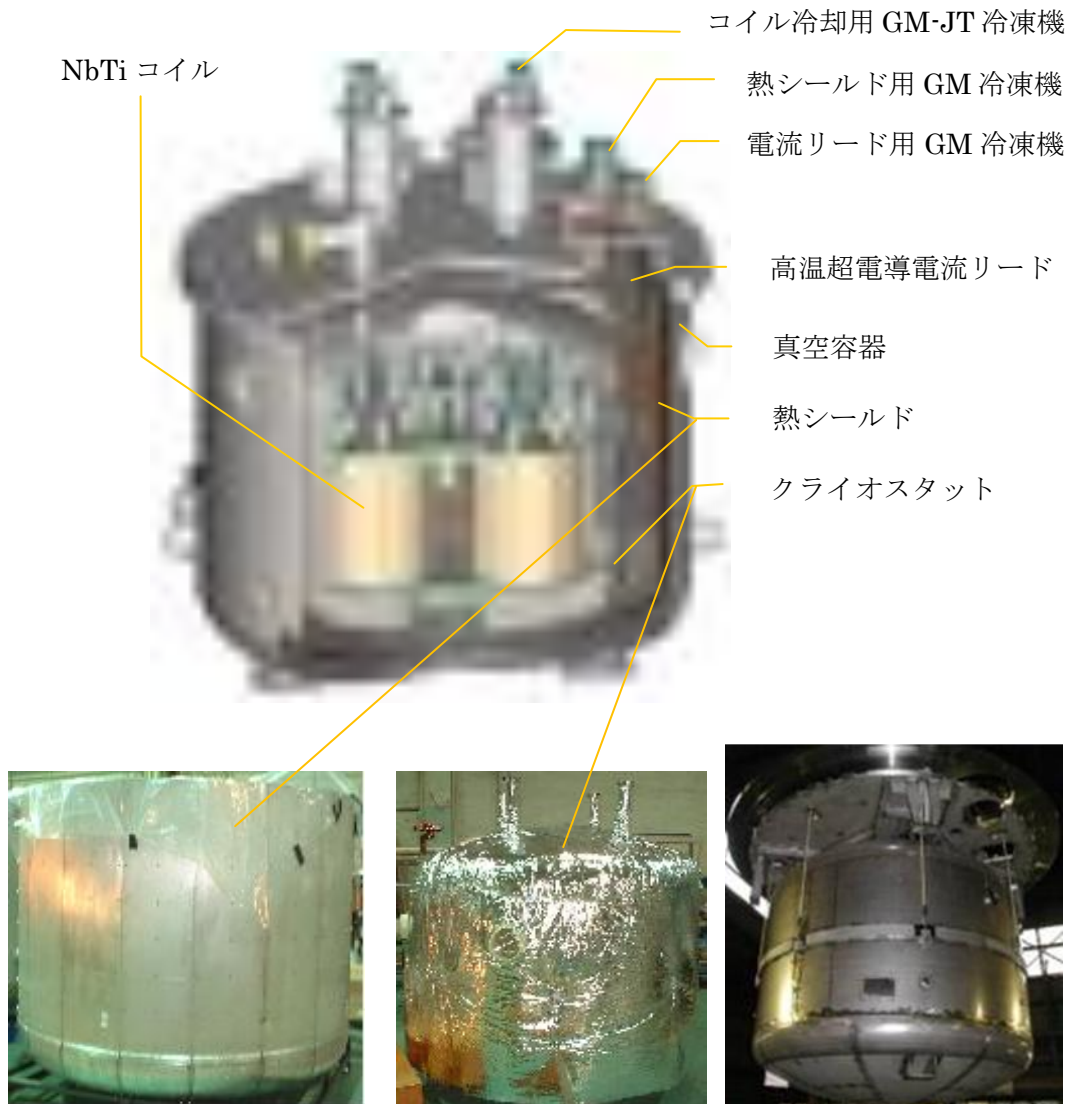


図 2-8 5 MW-5 MJ 瞬低補償用 SMES の内部構造



図 2-9 製作した 5 MW-5 MJ 瞬低補償 SMES

2. 3. 2 SMES コイルの基本性能試験

コイル製作後、基本性能を検証するため、コイルの絶縁試験および通電試験を実施した。超電導コイルの直流試験電圧に該当する技術基準上の規定はないため、式(2-5)で表される回転機機器の直流器に関する規定 JEC-2120(2000)を準用した。

$$V_t = 2E + 1 \text{ (kV)} \dots \dots \dots (2-5)$$

ただし、 V_t : コイル試験電圧

E : コイル定格電圧

コイルの絶縁性能を検証するため、この規定に準じ、直流 6 kV の耐電圧試験を実施した。また、実際のコイル印加電圧には出力開始時に急峻に 2.5 kV が印加されることから、定格電圧に過渡サージ電圧分を含めた最大ピーク電圧に基

づき、3 kV のインパルス試験を実施した。これらの結果、問題なくコイル絶縁性能を満足することを確認した。

次に、コイルの保護動作検証試験を実施した。定格電流からの遮断試験結果を図 2-10 に示す。コイルのインダクタンス設計値 2.08 H および保護抵抗値 1.78 Ω から計算される時定数は 1.2 s で、試験による電流減衰の時定数と一致しており、コイルが健全に製作されていることを確認した。また、図 2-11 に 10 時間定格通電した時の電流リードの電圧の時間変化を示す。通電時のジュール発熱による温度上昇で徐々に電圧が上昇したが、電流リードの電圧は 8 時間後に飽和し、安定したことから、電流リードシステムが健全に機能していることを確認した。

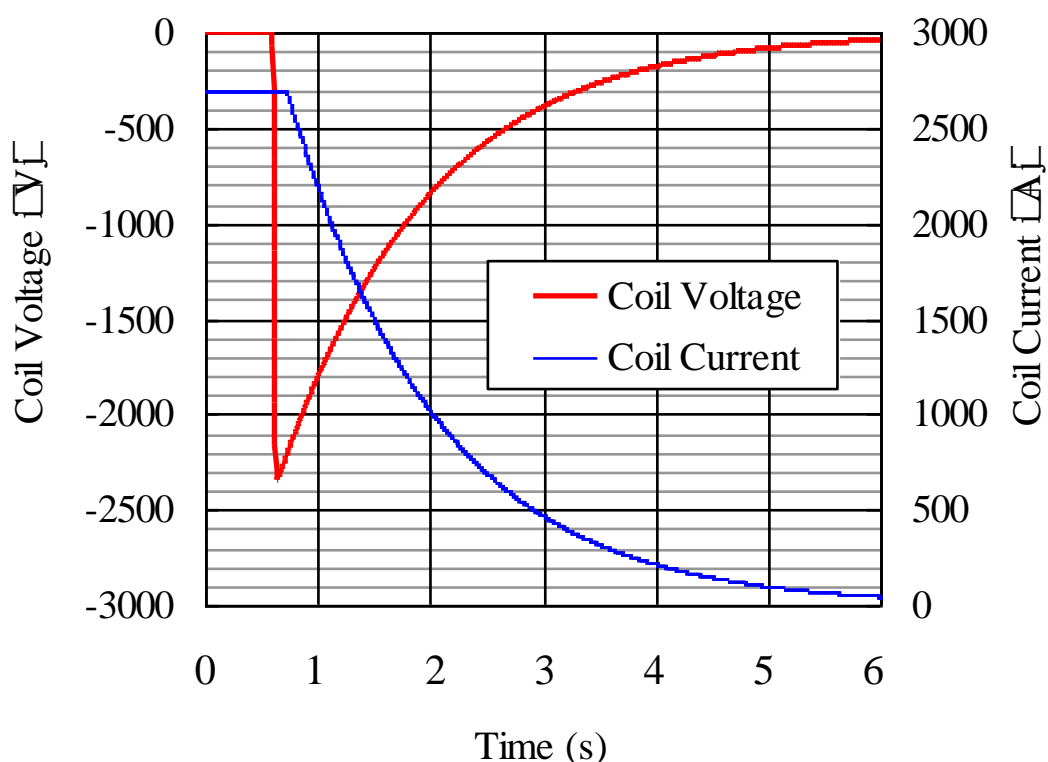


図 2-10 SMES コイルの保護動作試験

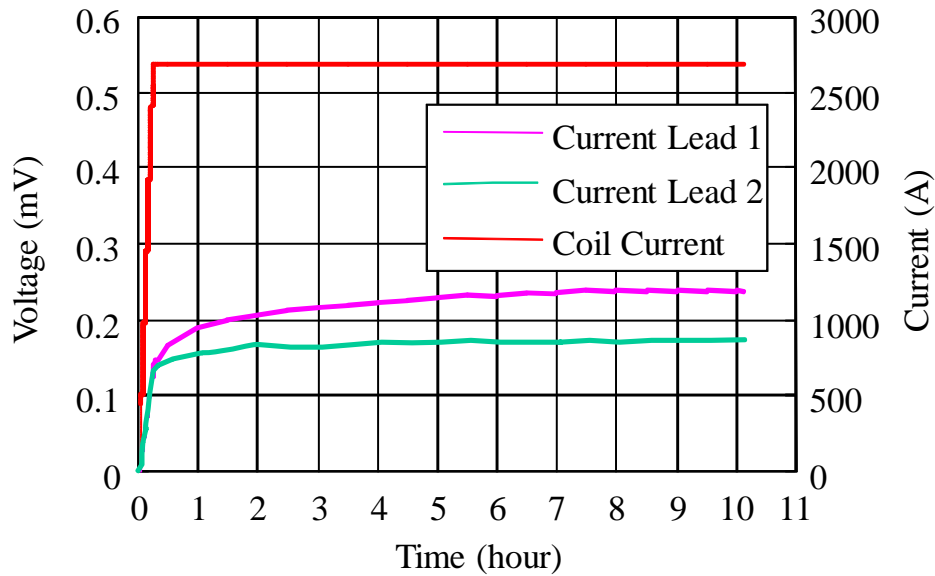


図 2-11 長時間定格通電時の電流リード電圧の時間変化

2. 4 5MW-5MJ SMES システム開発

2. 4. 1 SMES システムの設計・製作

(1) 全体構成

5 MW-5 MJ 瞬低補償 SMES システムの主要機器構成図を図 2-12 に示す。瞬低補償システムは、電力貯蔵部となる超電導コイルを冷却するクライオスタットおよび冷凍機類、事故時にコイルを保護する保護装置、コイルの貯蔵エネルギーを負荷側に放出する時に直流から 3 相交流に変換する交直変換器（待機時にはチョッパ回路部にてコイルの直流閉回路を構成）、瞬低発生時に負荷への電極供給を系統側から SMES 側に切り換える高速切換スイッチおよびそれらの監視・制御装置等から構成されている。コイル保護装置は、常時コイル電圧の差をモニタリングしているクエンチ検出器、コイルに直列接続されている直流遮断器、および直流遮断器に並列に接続されている保護抵抗器から構成されている。システムは常時、商用の 6.6 kV 電力系統に接続し、瞬低が発生した場合に補償できるように待機している。

システムの給電方式は、5ms以下の無瞬断での高速切り換えを実現するため、一般的に常時インバータ方式が採用されることが多い。この方式は、瞬低時の遮断切換動作が不要となるが、常時交流を直流に変換し、電力貯蔵部が接続された直流回路を経由して再度直流から交流に変換するため、常時の損失が大きい。瞬低補償装置は、基本的に年間を通してほとんど全て待機しているため、待機損失を低減することが極めて重要である。そこで、今回、常時は電力系統から直接負荷へ電力を供給し、電力貯蔵部は変換器で切り離し待機する常時商用給電方式を採用した(図 2-13 参照)。この方式では、5ms程度の急峻な遮断・切換動作が要求されるため、瞬低検出、高速切り換え、高速電圧立ち上げ等の高度な技術を要する。表 2-3 に瞬低補償 SMES システムの主要仕様を示す。

(2) 瞬低検出方式

常時商用給電方式では、待機時の損失を大幅に低減することができるが、高速切換動作のためには、瞬低を瞬時に検出するとともに電力供給を瞬時に系統側から SMES 側へ切り換える必要がある。ここで、瞬低検出の場合は、許容される瞬低時間が系統電圧周期より短いため、平均的な実効値ではなく、瞬時的な実効値を用いる必要がある。このため、瞬低検出方式として各相電圧瞬時値を用いた式(2-6)に示す空間ベクトル振幅による検出方式を採用した[4]。

$$V_v = \{ (2V_A - V_B - V_C)^2 / 18 + (V_B - V_C)^2 / 6 \}^{1/2} \dots \dots \dots (2-6)$$

ただし、 V_v は空間ベクトルの振幅

V_A, V_B, V_C は各相電圧瞬時値

この方式により電圧ベクトルの振幅が規定値を下回るかどうか判断することで、電力系統での瞬低発生の相や様相等によらず、瞬低を瞬時に判断し、検出することを可能とした。さらに、瞬時値(例：75%-瞬時)と規定値以下を一定時

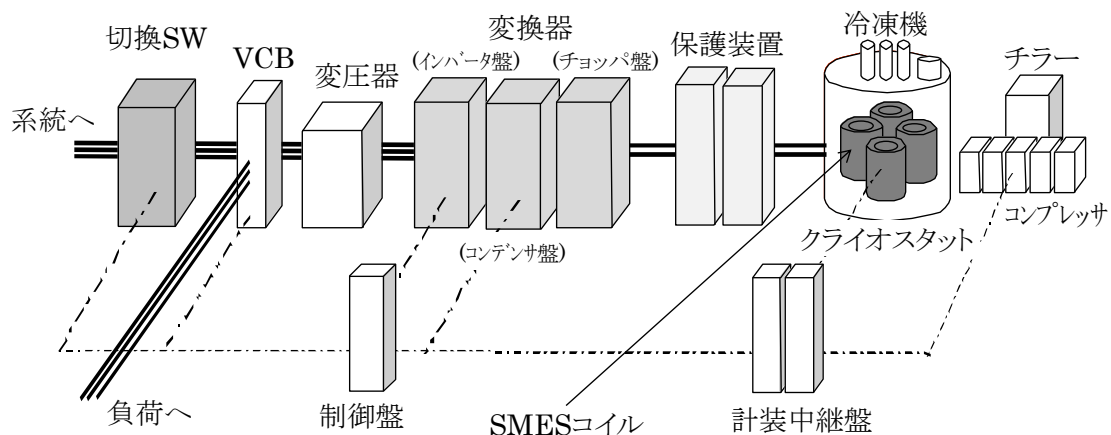
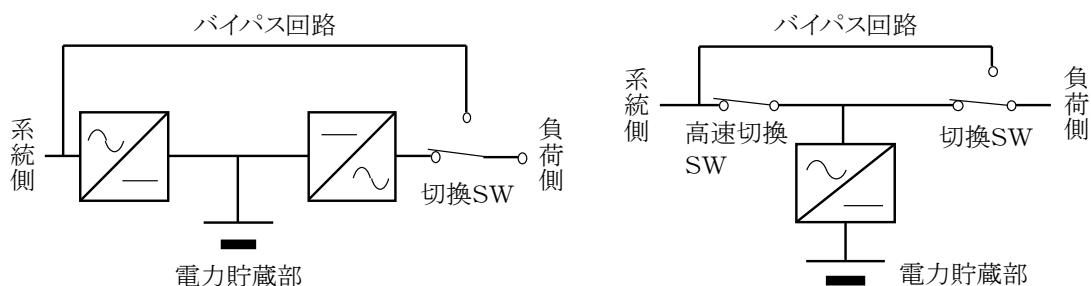


図 2-12 5 MW-5 MJ 瞬低補償用 SMES の主要機器構成図



(a) 常時インバータ給電方式

(b) 常時商用給電方式

図 2-13 電力貯蔵装置による給電方式の比較

表 2-3 5 MW-5 MJ 瞬低補償用 SMES システムの主要仕様

給電方式	常時商用給電方式
定格入出力電圧	60 Hz, 3 相交流 6.6 kV
定格出力および継続時間	5 MW, 1 s
切換所要時間	5 ms クラス
電力貯蔵部	NbTi コイル

間継続した場合に動作するための限時値(例:93%-10ms)の2点で瞬低検出を行うこととし、大型誘導負荷の始動時にも誤動作しないように工場負荷の電圧変動に留意し、電圧低下度と継続時間の基準点を設定した。なお、復電の検出においても的確に判断できるよう復電検出値(例:98%-20ms)の設定にも留意が必要である。

(3) 高速切換スイッチ

常時商用給電方式では、高速検出とともに高速切り換え動作が不可欠となり、切り換えに高度な技術が要求される。これを実現するため、高速切り換えスイッチには当時機械式スイッチより高速で遮断できるサイリスタスイッチを用いた。しかし、サイリスタスイッチは交流電流がゼロとなる瞬間しかオフとすることができないので、遮断指令を受けた時のサイリスタ電流の位相に依存し、最長の場合、1/2 サイクル(約8ms)の時間を要する。この場合、瞬低の影響が負荷側に及ぶ場合があり、瞬低補償装置としての機能を果たさなくなる。そこで、コイルに貯蔵されているエネルギーの一部を利用し、変換器からサイリスタスイッチに流れる系統電流を打ち消す方向に電圧を印加する制御方法を採用した。図2-14にサイリスタスイッチ遮断時の電圧イメージを示す。サイリスタスイッチでは通常b点で電流がゼロになり、青実線のように遮断されるが、この方法により、系統電流を強制的に瞬時にゼロにすることで、赤実線のようにa点で系統電流を遮断することが可能となる。すなわち、ab間の時間を短縮し、瞬低発生時の位相に依存せず、瞬時に系統側からSMES側へ負荷電圧を切り替えることが可能となる。

(4) 交直変換器

図2-15に瞬低補償用SMESシステムを連結した電力供給システムの主回路構

成図を示す。ただし、今回は試験のための瞬低模擬回路のリアクトルが連結されている。交直変換器は単相 IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)モジュールの組み合わせにより 3 相を構成し、2 段積み上げている。チョップ回路と充電回路は IEGT により構成している。待機時の損失を低減するため、コイルは変換器と独立した充電回路で定格電流まで充電される。直流コンデンサによりコイル電圧を一定に維持しており、瞬低発生時にはチョップ回路がオフとなり、コイルの貯蔵エネルギーが放出され、最大 2.5 MW のエネルギーが各変換器でパルス幅変調により 3 相変換され、変圧器で 6.6 kV に昇圧され、供給される。

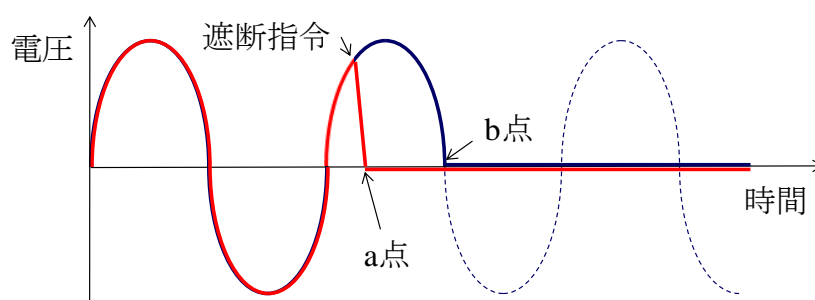


図 2-14 サイリスタスイッチ遮断時の電圧波形（赤：逆電圧加圧時）

2. 4. 2 SMES の定格模擬負荷試験

目標容量の 5 MW-5 MJ 瞬低補償 SMES システムを設計・製作することができたため、実用化への重要なステップとして、システムの健全動作、信頼性等を検証する必要がある。そこで、模擬負荷を用いた定格補償動作試験、模擬瞬低信号による実負荷補償試験、実フィールド試験の順に検証を実施した。初めに SMES システムを試験系統に接続し、定格容量の模擬負荷を用いて試験検証を実施した。

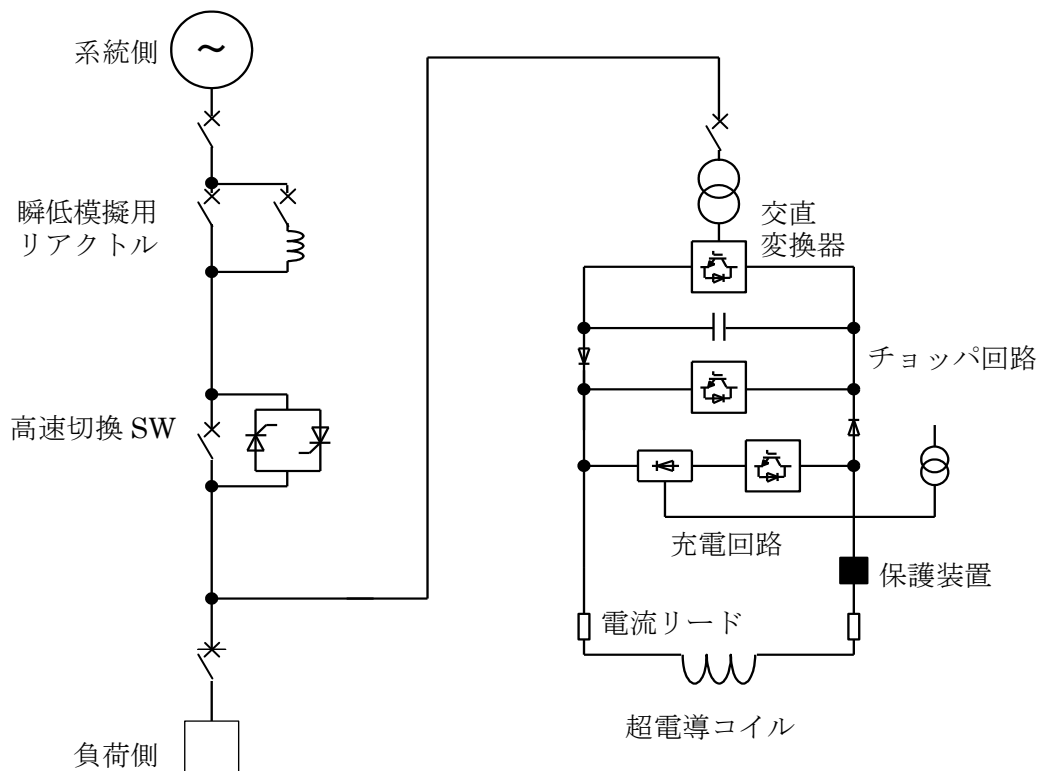


図 2-15 瞬低補償 SMES システムを連結した電力システムシステムの主回路構成図

(1) 模擬負荷試験条件

図 2-13 に示す電力システムシステムにおいて負荷側に SMES 定格容量となる 5 MW 抵抗器を模擬負荷として接続し、SMES からの電力切換試験を実施した。電力システムから 5 MW 抵抗器へ電力を供給している通常の待機状態において、電力システムに直列に接続した瞬低模擬回路のリアクトルを用いて強制的に瞬低を発生させ、瞬低検出動作特性、切換動作特性を確認した。

(2) 模擬負荷試験結果

試験結果の波形を図 2-16 に示す。系統側・負荷のデータは実測した 2 相のみ表示している。瞬低模擬信号により系統電圧が低下 (模擬瞬低) すると、SMES

電圧指令により遮断信号が送られ、SMES から変換器を介して出力を開始する。SMES からの出力電圧は、高速切換サイリスタスイッチの電流（系統電流）を打ち消す向きに印加され（図 2-14 参照）、強制的に電流をゼロまで減少させ、系統が切り離されると同時に、SMES から負荷側への補償動作が開始されている。この瞬低発生から補償動作開始までの一連の切換動作は 3~4 ms で実現できている。今回の 5 MW 抵抗器を用いた電力切換試験により、電力系統側瞬低の高速検出、高速かつスムーズな切換および 5 MW-1 s の高速出力が全て健全に動作することを検証した。

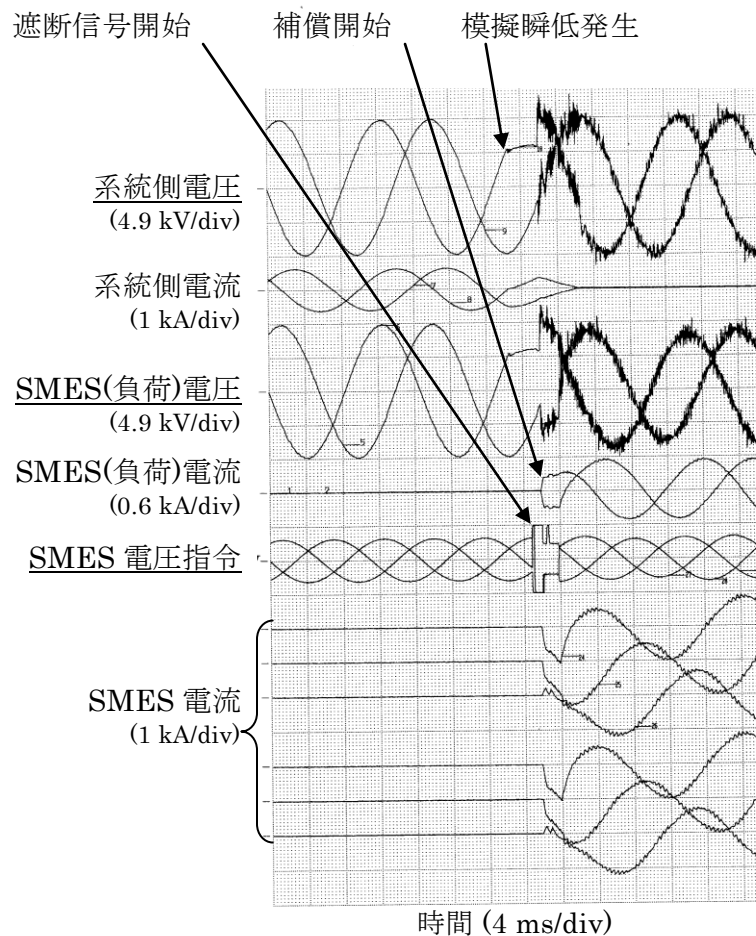


図 2-16 SMES システムによる瞬低検出および系統切り換え時の各波形

2. 4. 3 SMES の実負荷模擬瞬低試験

定格模擬負荷試験による検証後、SMES システムを実際に大型液晶・TV 工場に瞬低補償装置として導入した。模擬的に瞬低を発生させ、工場負荷に対する補償動作試験を実施し、SMES システムの健全性を確認することとした。ただし、工場実負荷に対する試験では確実に健全な補償動作を実現させなければならないため、試験実施前に同一試験条件でシミュレーション評価し、その後、実際に実負荷模擬瞬低試験を実施した。

SMES システムの導入に際し、冷却塔を除く全ての機器は屋内仕様とした。

図 2-17 に SMES 建屋(14.5 m×18 m)内の SMES システムの設置状況を示す。

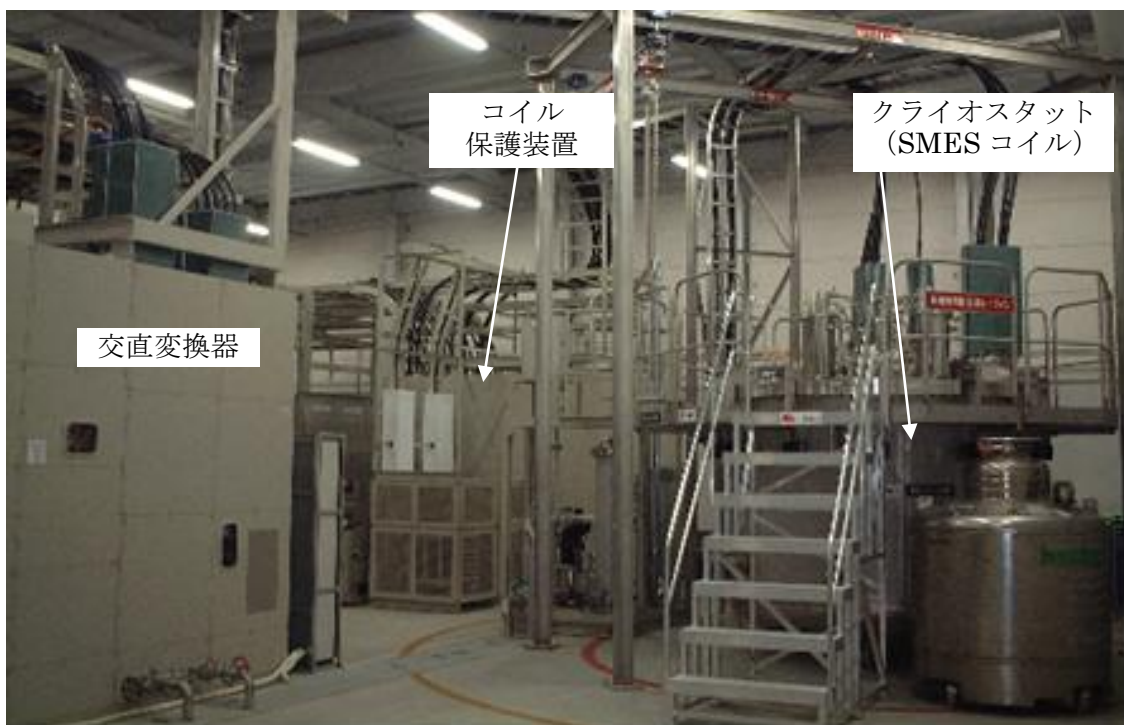


図 2-17 建屋における SMES システム設置状況

(1)実負荷試験シミュレーション

実負荷試験における SMES システムの瞬低切替時の制御能力（電力変換器による高速切替サイリスタスイッチの電流ゼロ制御、変換器の立ち上げ速度等）を把握するため、シミュレーションを実施した。対象となる工場の負荷は高品質な電力が要求される LR 負荷で力率 0.9 の負荷モデル（直結誘導モータ 20%、回生なしインバータ稼働のモータ 40%、回生ありインバータ稼働モータ 40%）を想定した。

予定している実負荷試験と同様に、瞬低なしの状態で切り換える時の SMES 補償電圧のシミュレーションを実施した。ただし、今回の工場の電力系統は負荷側に SMES 定格容量の 4 倍の 20 MVA 負荷変圧器が接続されることとなったため、負荷側変圧器が SMES 定格と同じ 5 MVA の場合に加え、20 MVA 変換器の場合についてもシミュレーションを実施した。切り換え時のシミュレーション結果を SEMI(半導体プロセス装置仕様)および対象工場の過去の瞬低による被害実態とともに図 2-18 に示す。負荷側変圧器が 5 MVA の場合、高速に電圧が確立され、工場への影響はないと判断できるが、20 MVA の場合、SEMI は満足するものの、実際の被害実態に対しては不十分であることが判明した。これは系統からの切替時に高速切替サイリスタスイッチの電流を打ち消すように変換器から印加される逆電圧による電流が、負荷側変圧器の励磁突入電流として吸収され、負荷側に電圧が確立できないためと考えられる。

そこで、切替時の変換器からの逆電圧が負荷側へ吸収されないようにするため、対策として図 2-19 に示すように負荷の系統側へリアクトルを挿入することを検討した。また、実運用では瞬低状態で動作し、瞬低無しの条件では電圧確立が十分であるか明らかでなかったため、瞬低状態からのシミュレーションを実施した。この結果を SEMI および過去の瞬低による工場被害実態とともに図 2-20 に示す。1/2 サイクル以下での電圧立ち上げと同時に過電圧抑制の制御が

要求されるため、1 サイクル付近で電圧が一旦低下しているが、30 %までリアクトルを挿入することにより、過去の瞬低による工場被害の有無と比較しても電圧確立時間が十分に短縮されており、瞬低の被害は解消されると推定される。

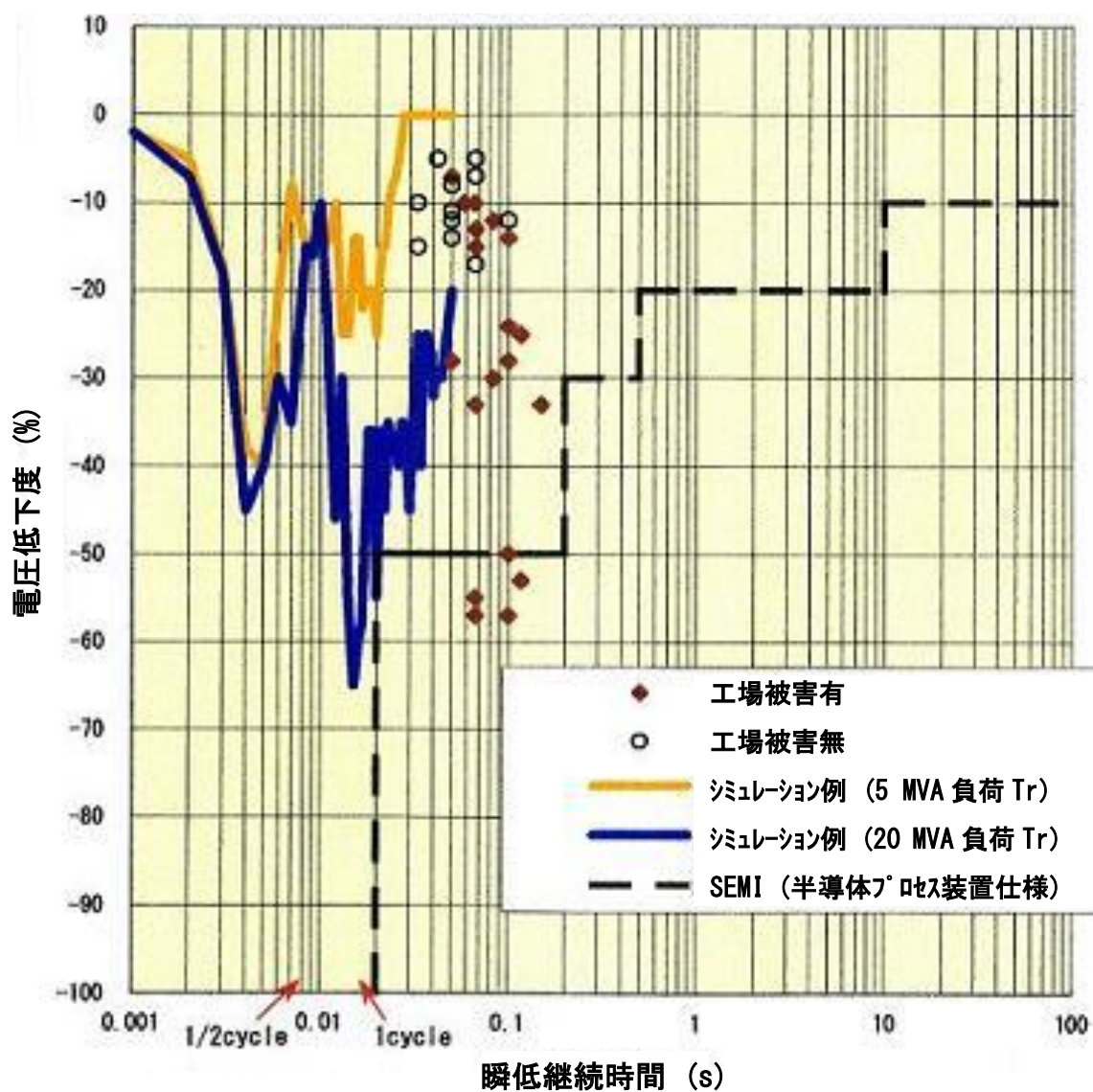


図 2-18 シミュレーションモデルでの切り換え時の負荷側電圧と瞬低被害実態

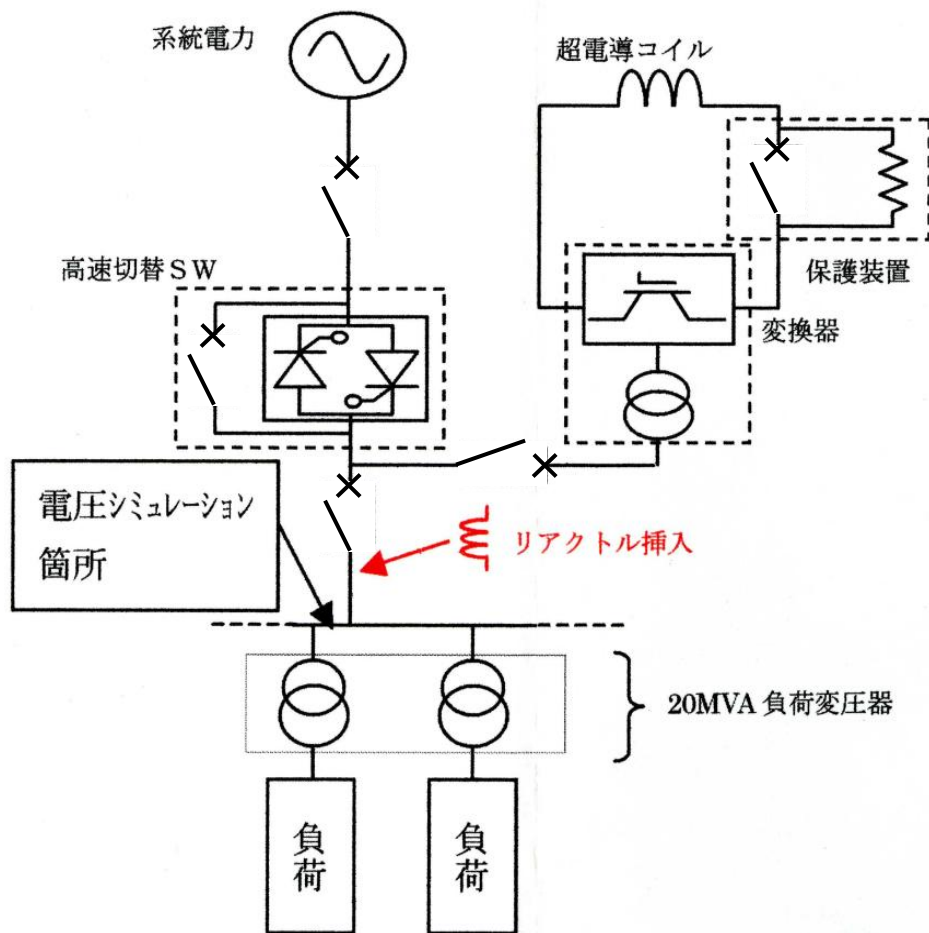


図 2-19 20 MVA 負荷変圧器の場合のリアクトル挿入モデル

(2)実負荷試験条件

実負荷試験シミュレーション結果より 30 %リアクトルの挿入が必要と判断し、SMES システムへの採用を決定した。実負荷模擬瞬低試験においては、SMES システムを工場負荷に連結した状態で、瞬低模擬信号を変換器の制御盤に入力し、電力系統に故障がない状態で負荷への電力供給を強制的に電力系統から SMES へ切り換え、SMES 補償動作を一定時間継続後、電力供給を系統側へ切り戻すという方法で実施した。試験時の対象負荷の容量は約 3 MW で、模擬瞬低発生時間は 0.5 s とした。

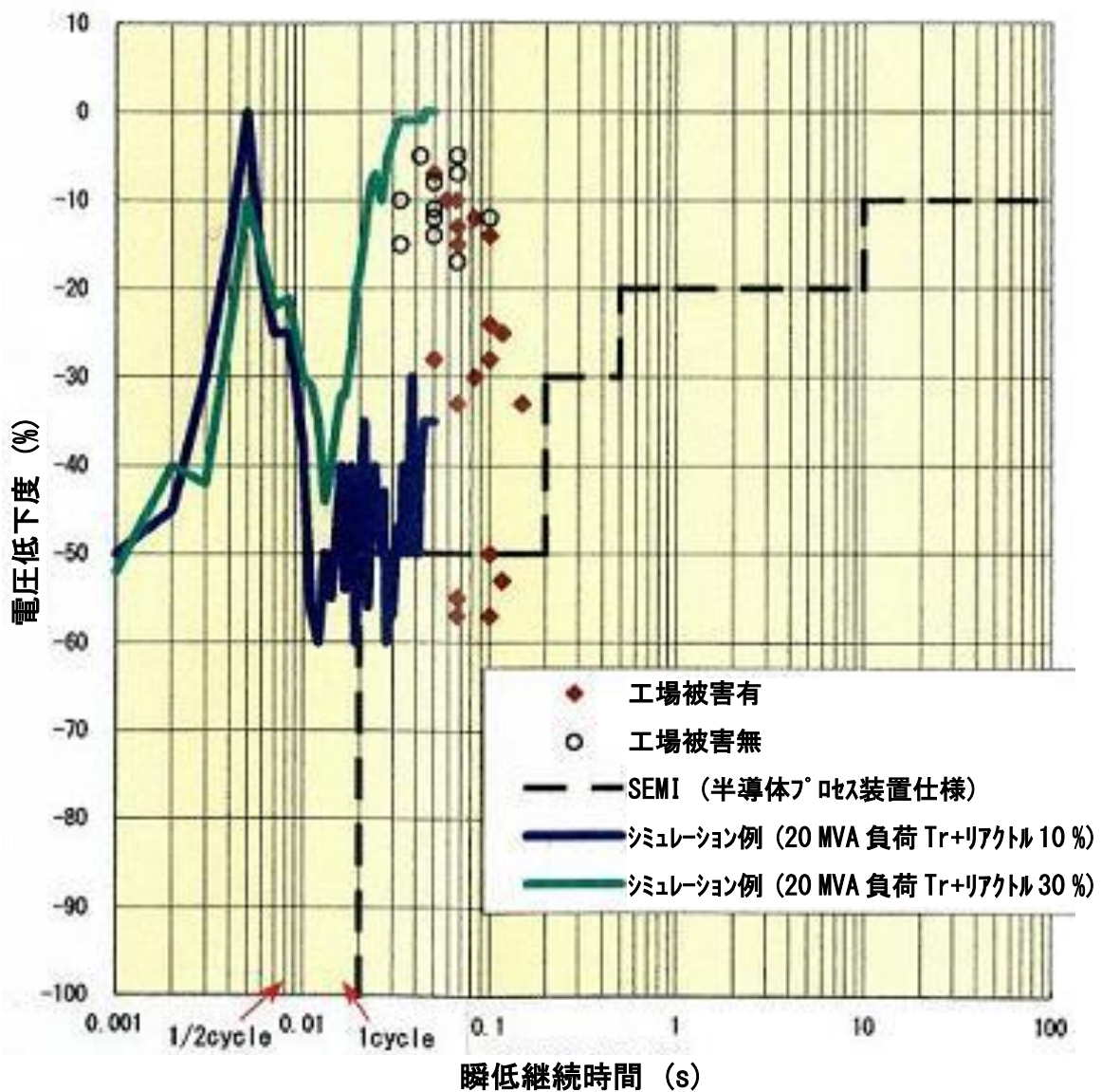


図 2-20 リアクトル挿入モデルでの切り換え時の負荷側電圧と瞬低被害実態

(3)実負荷試験結果

実負荷試験結果の系統電流、負荷電圧・電流の波形（それぞれ実測した 2 相分を表示）を図 2-21～2-23 に示す。負荷電流は SMES 変換器から供給された電流を示している。電力波形には高調波が含まれており、その影響を検討したが、1 s 以下等の条件からその影響を評価し、問題ないと判断できたので、切り

換え時の高速電圧確立を優先し、高調波フィルターは挿入しないこととした。

図 2-21 は全体波形で系統からの電流が遮断されると同時に SMES からの電流が負荷へ流れており、系統再連系時に SMES からの負荷電流が切り離され、系統側から電流が流れているのが確認できる。切換時の拡大波形を図 2-22 に、切り戻し時の波形を図 2-23 に示す。系統再連系時にはスムーズに系統側へ切り戻されているのが確認できるが、系統切換時の電圧の立ち上がりが十分であるかどうか確認するため、その電圧確立状況について 3 相交流電圧ベクトルで評価した。

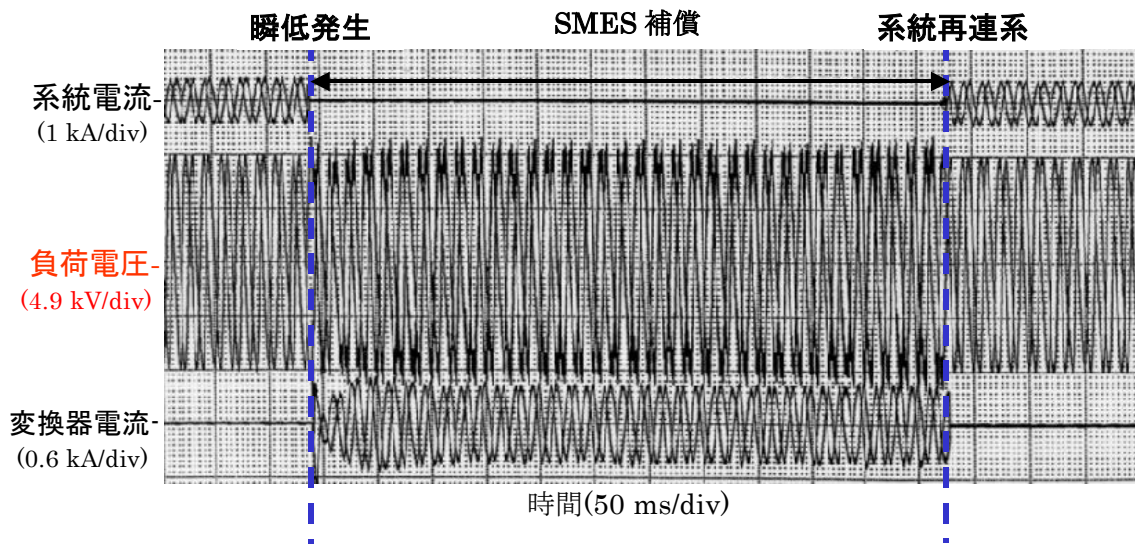


図 2-21 系統遮断から再連系までの系統電圧、負荷(SMES)電圧・電流波形

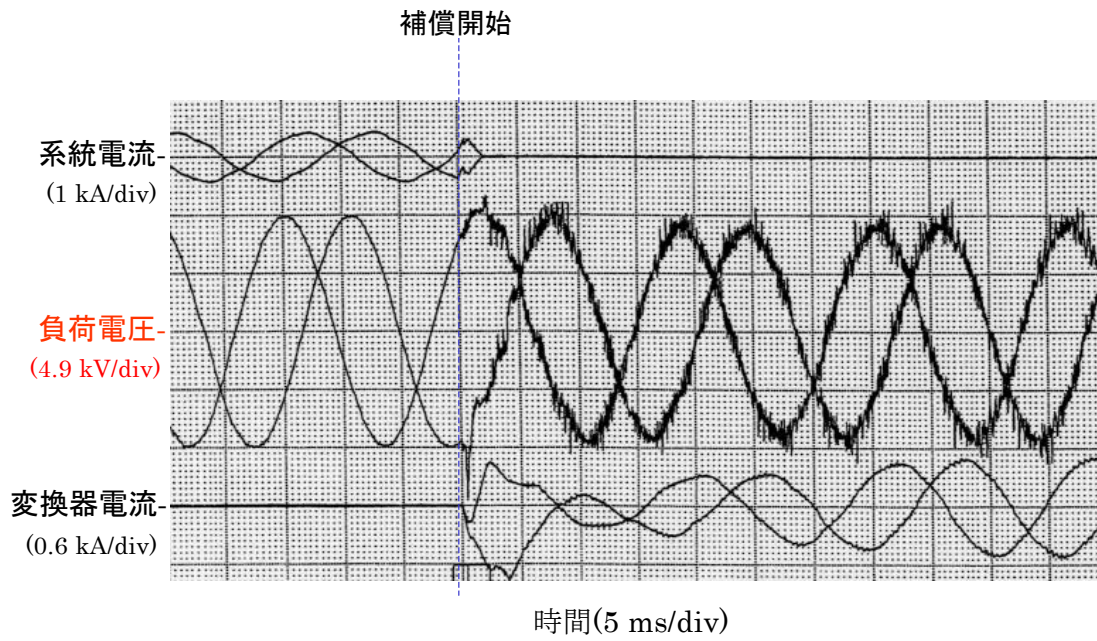


図 2-22 系統遮断時の系統電圧、負荷(SMES)電圧、変換器電流波形

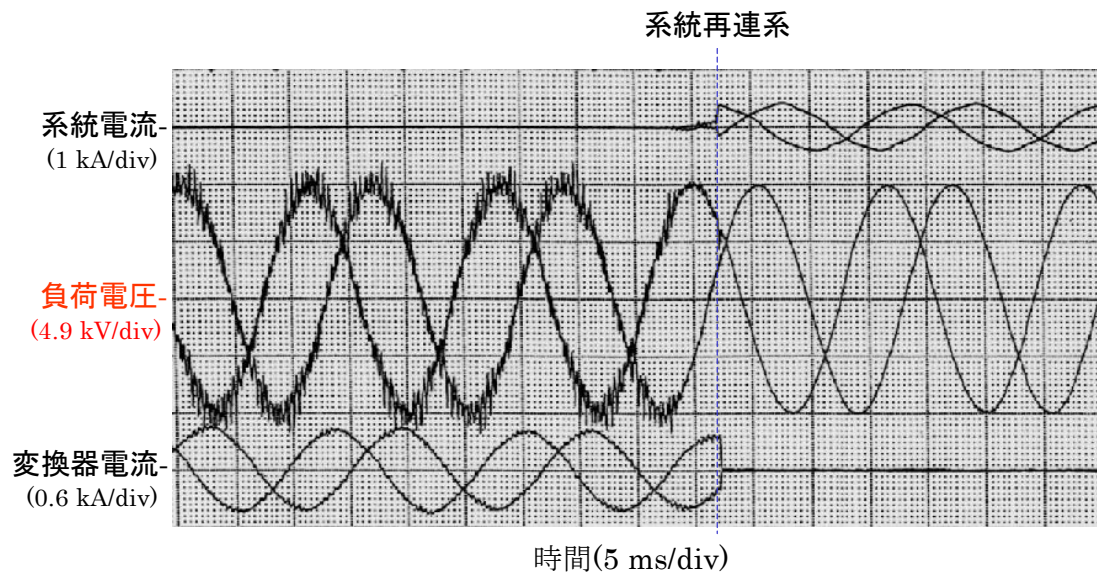


図 2-23 系統再連系時の系統電圧、負荷(SMES)電圧、変換器電流波形

高速切換スイッチおよび電力変換器による切換速度や電圧確立度を評価するため、瞬低補償動作時の 3 相交流電圧を演算した結果を図 2-24 に示す。この結果は負荷側の 3 相交流電圧を式(2-6)により合成した空間ベクトルの振幅である。図 2-24 において、電力系統の電圧は常時 1.04 PU であり、急峻な電圧上昇時が補償開始時である。系統遮断時に変換器から切換サイリスタスイッチに逆電圧を印加するが、この急峻な電圧上昇は、今回は模擬瞬低で系統電圧が低下していなかったため発生したと考えられるが、短時間で 1.20 PU を下回り、問題ないレベルであった。負荷電圧が 1.00 PU より小さい時は実負荷が電力系統から切り離され、変換器からの補償が開始されている。瞬低補償動作時の要求電圧は 1.00 PU で、電圧が開始から 1.00 PU に戻るまでの時間は約 50 ms であった。実負荷は 20MVA 負荷変圧器に接続されているため、励磁突入電流により負荷電圧は一度低下しているが、電圧低下を停止させる制御効果が確認された。瞬低補償完了後、電力供給を系統側に切り換えたため、50 ms 付近において電圧は 1.00 PU から 1.04 PU に切り換わっている。以上より、実負荷に対しても SMES システムが健全に動作することが確認された。

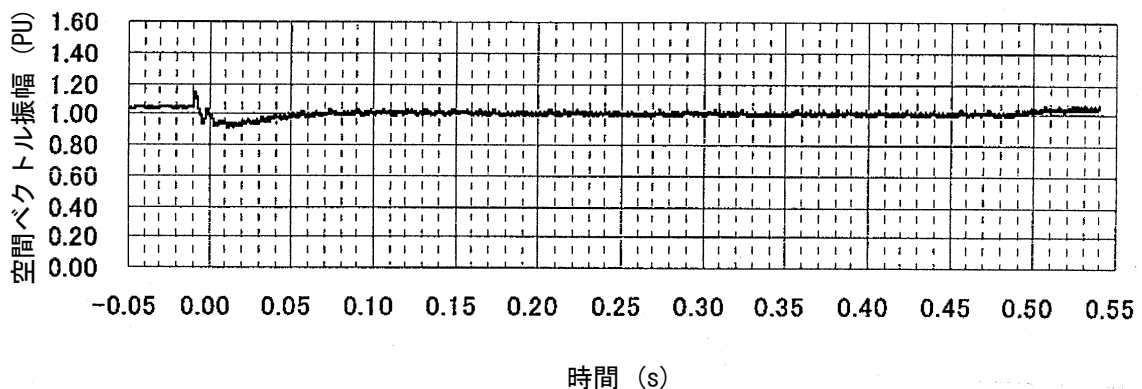


図 2-24 実負荷に対する 3 相交流電圧の空間ベクトルの振幅

2. 4. 4 SMES の実フィールド試験

これまでに、定格 5 MW 出力容量の模擬負荷に対して瞬低補償動作が健全に実施されることを検証するとともに、実負荷に対して模擬瞬低により、健全に系統から SMES への切り換え・切り戻し動作が実施されることを検証した。最終的に、SMES システムを実用設備として実負荷に接続し、長期間フィールド試験を行うことで、システムの健全性、長期信頼性を検証することとした。2003 年 7 月から 2 年を超える長期間フィールド試験を実施した。1 年目は全く瞬低が発生しない年となったが、待機時の効率や信頼性を評価した。その後、2 年目に多重雷を含む瞬低を何度も経験し、SMES システムの瞬低補償実動作を検証することができた。一例として図 2-25 に瞬低補償動作時のフィールド試験サイトの系統電圧と補償された実負荷電圧を示す。この時、落雷による 77 kV 送電線での 2 回線地絡故障により引き起こされた瞬低を経験した。連続して最大電圧低下度 35 % の瞬低が発生した様相が観測されたが（図 2-25(a)参照）、瞬低の間、SMES システムが健全に補償動作を実施したことを確認した（図 2-25(b)参照）。図 2-26(a)に瞬低補償開始時および図 2-26(b)に瞬低補償完了時の負荷側電圧の拡大図を示すが、瞬時の切り換え動作と電圧確立、ならびに同期したスムーズな解列動作が確認できる。

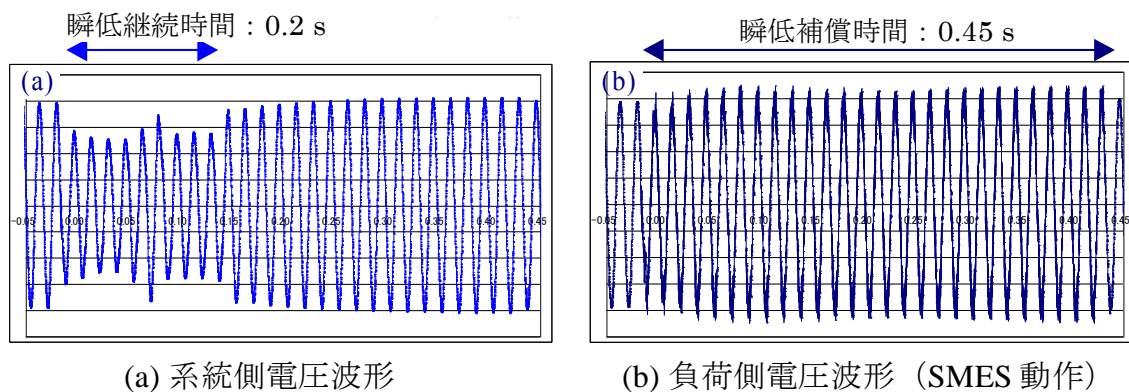


図 2-25 瞬低発生時の実フィールド試験結果

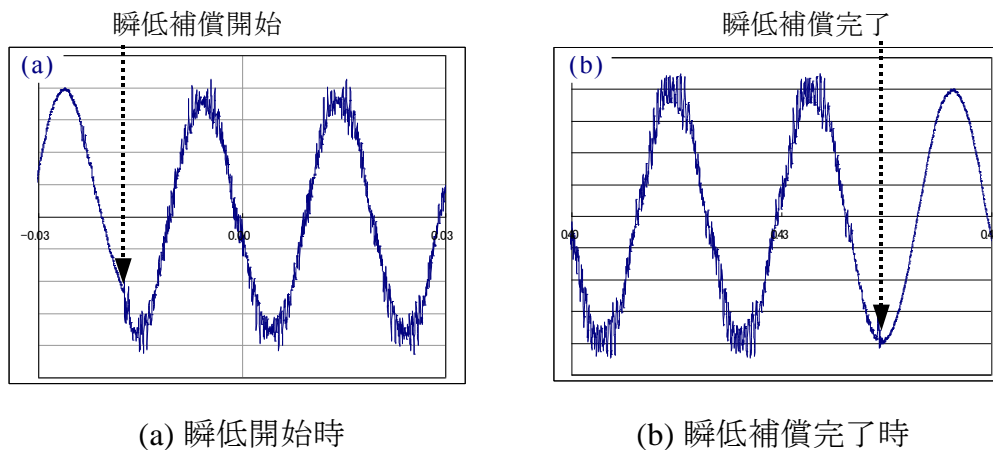


図 2-26 瞬低発生時の実フィールド試験結果（負荷側電圧波形拡大図）

2. 5 瞬低補償 SMES システムの特性改善

5 MW-5 MJ 瞬低補償 SMES システムを用いた検証試験により、瞬低補償用 SMES に関する多くの知見を得た。これらの知見をもとに SMES 特性改善を図り、最終目標容量の 10 MW-10 MJ 瞬低補償 SMES システムを完成した。

主に SMES コイルの高電圧化を図り、待機時のコイルおよび変換器チョッパ回路の通電電流を低減することで損失の低減を図った。図 2-27 に利用可能エネルギーを倍増した 10 MJ の新規要素コイルの断面構造図を示し、図 2-28 に 5 MJ と 10 MJ の要素コイル比較図を示す。10 MJ のコイルではコイル 1 個で構成していた要素コイルを 2 種類のコイルにより 4 分割して構成することで、層間電位差の低減を図った。これにより、高電圧化と大型化により層間電位が 400 V から 135 V へ低下しているにもかかわらず、2.5 kV から 6.6 kV へ高電圧化を実現した。さらに両端側コイルの口径を中央部コイルより小さくしたことにより、発生磁界を束ねる方向でコイル経路磁界を低減し、コイル臨界電流 I_c の低下を抑え、大容量化を可能とした。また、この構造においては端部コイルの電磁力による軸方向圧縮力を FRP で支持することも可能となり、図に示すように軸圧縮力を 23 MPa から 13 MPa へ低減した。

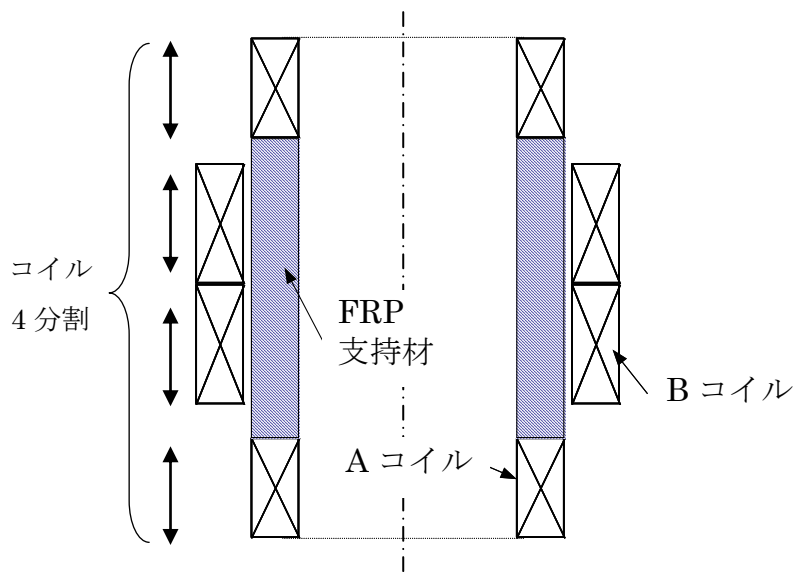
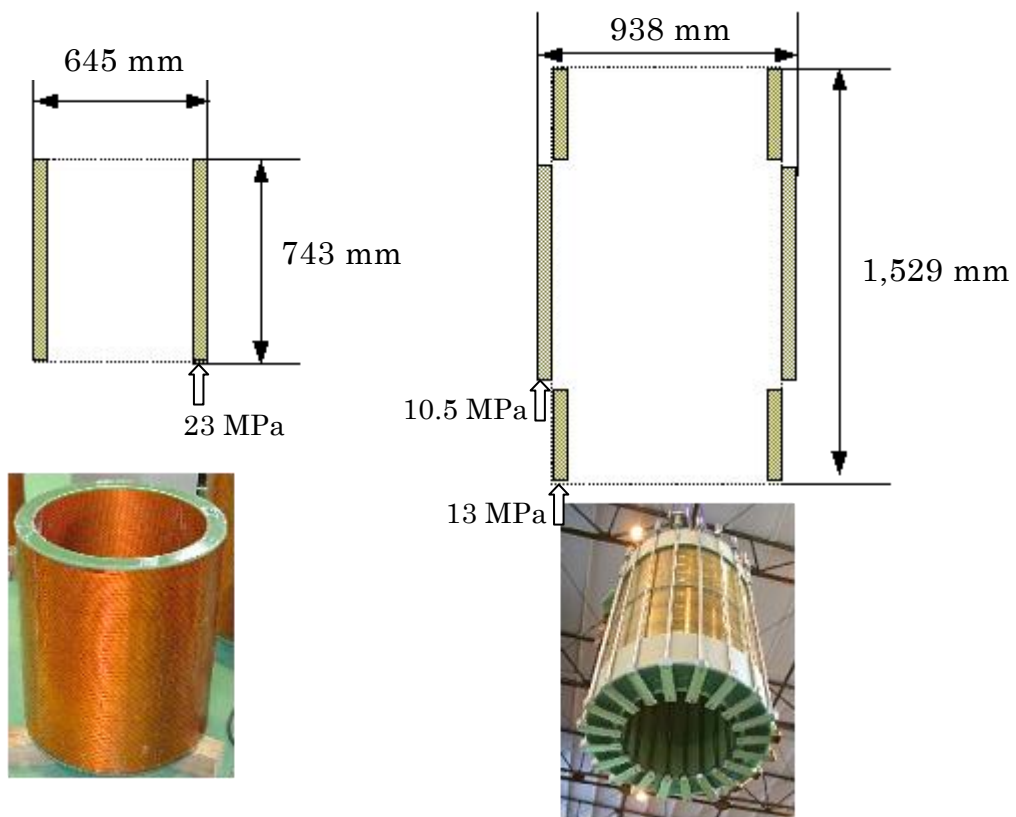


図 2-27 10 MJ 構成コイル構造図



(a) 5 MJ SMES 用
1.55 MJ 単一型コイル

(b) 10 MJ SMES 用
5.23 MJ 分割型コイル

図 2-28 瞬低補償 SMES 用 4 極配置コイルの要素コイル

コイルの高電圧化を図ることで、コイル電流の低減が可能となる。電流低減により、待機時における電力貯蔵ループ電流におけるチョッパ回路等での損失を低減させるとともに、電流リード容量の低減により極低温のコイルへの熱侵入量を低減させ、冷却効率を向上させることができた。その結果、貯蔵エネルギーを3倍に大容量化したにもかかわらず、5 MW コイルの時に3台用いていたシールドおよび電流リード用冷凍機を2台に低減することができ、システムの高効率化が実現できた。5 MW-5 MJ と 10 MW-10 MJ 瞬低補償 SMES の主要諸元を表 2-4 にまとめ、その SMES コイル内部構造比較図を図 2-29 に示す。

表 2-4 瞬低補償 SMES の主要諸元比較

比較項目	5 MW-5 MJ SMES	10 MW-10 MJ SMES
貯蔵エネルギー (MJ)	7.43	20.7
最大補償出力 (MW)	5	10
補償時間 (s)	1	1
直流定格電圧 (kV)	2.5	6.6
直流定格電流 (kA)	2.657	1.4
冷凍機数 4K / 80K	3 / 3	3 / 2

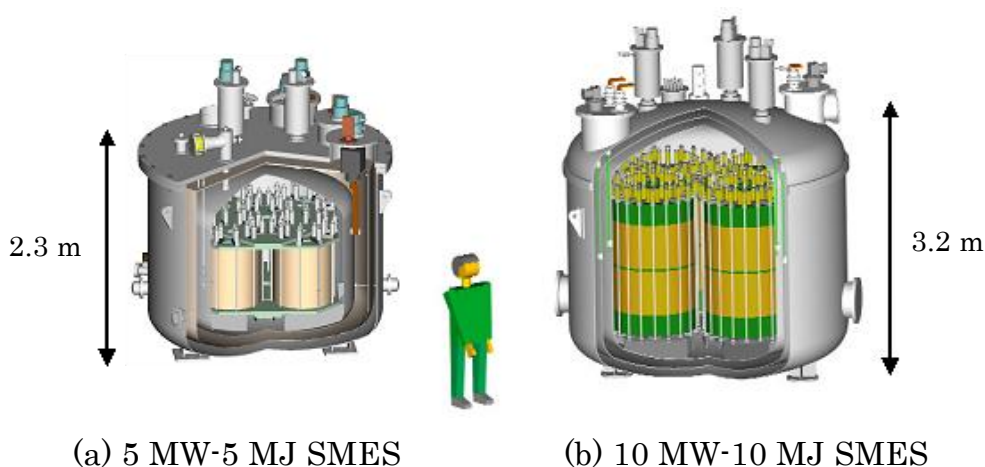


図 2-29 瞬低補償 SMES コイル内部構造図

今回実用化した瞬低補償用 SMES システムは、確立した技術性能・フィールド試験実績が認められ、新たに商用機が 2 台導入され、現在も稼働し続けている。しかしながら、電気二重層キャパシタ等の他の瞬低補償装置においても大容量化が図られてきており、SMES は経済性において改善が必要となっている。

2. 6 結論

大容量瞬低補償装置として、世界最大の 10 MW-10 MJ SMES システムを開発し、フィールド試験等を経て実用化した。それらの結果を要約すると下記のとおりである。

- (1) 大容量瞬低補償ニーズに対する最適な装置として SMES が選定され、金属系超電導線材を採用することで、早期に実用化技術を確立した。
- (2) 以下の性能を実現する瞬低補償用 SMES システムを開発した。
 - ・変換器逆電圧印加・リアクトル挿入による高速切換（瞬低補償装置として不可欠な性能）
 - ・コイルの大電流・高耐電圧による工場一括補償
 - ・4 極反転コイル配置の採用による金属系のコンパクト化・漏洩磁界低減
 - ・コイル中間電位の接地による熱侵入量低減
 - ・常時商用給電方式、独立充電回路の採用による待機損失低減・小型冷凍機組合せによる簡便な運用・保守
- (3) SMES コイルの設計裕度および耐電圧試験準用基準等を決定し、各種検証試験結果、実運用上問題ないことを確認した。
- (4) 以下の検証試験により、開発した SMES システムの性能を実証した。
 - ・定格模擬負荷抵抗を用いた瞬低補償検証試験
 - ・実負荷を用いた模擬瞬低信号による SMES 補償動作検証試験

- ・実系統で実負荷を用いた2年を超える長期フィールド試験
- (5) 5 MW-5 MJ SMES システムの知見から、世界最大容量 10 MW-10 MJ の SMES システムにおいて、コイルの 6.6 kV への高耐電圧化により冷凍機負荷およびチョッパ回路部通電損失を低減し、システム全体の高効率化を実現した。
- (6) 瞬低補償システムとして、SMES の電源システム側（変換器側）の最適化技術を確立した。一方、SMES のコイルシステム側に関しては、金属系コイルで実用化したものの、温度マージン(1.8 K)や熱容量の低さから、温度安定性の改善による信頼性向上やさらなるコスト低減が課題であることを明らかにした。

第2章の参考文献

- [1] 佐藤寛, 佐野耕市: 「大容量瞬低対策装置の開発状況と課題」、電気評論、No. 443, pp. 37-42, 2002.
- [2] 長屋重夫: 「超電導瞬低補償 SMES の開発」、電気評論、No. 476, pp. 69-72, 2004.
- [3] M. Shimada, S. Hanai, H. Ogata, K. Nakamoto, N. Hirano, S. Nagaya, H. Onoda, S. Koso, Y. Tatsuta, H. Ohsaki: “Development of the demonstration model coil for a cost reduced 100MW/500kWh SMES,” Institute of Physics, Conference Series, No.181, pp.572-579, 2004.
- [4] 電気学会・半導体電力変換システム調査専門委員会編: 「パワーエレクトロニクス回路」、オーム社、pp. 75-77, 2005.