

明 細 書

発明の名称： 冷却システム及び冷却システムの制御方法

技術分野

[0001] 本開示は、冷却システム及び該冷却システムの制御方法に関する。

背景技術

[0002] 超電導ケーブルを用いた電力ケーブルシステムは、超電導ケーブルの軸線方向に沿って液体窒素などの極低温冷媒を循環させて超電導ケーブルを冷却し、超電導状態を維持している。万一の事故時など、定格電流以上の過大な電流が電力系統に流れ、常電導状態に移しようとした時、瞬時に電流を遮断する機能をもった限流器が必要となるが、従来、超電導ケーブルと限流器とを組み合わせ使用された例はあまり見当たらない。

[0003] 特許文献 1（特に図 3 5）には、超電導ケーブルと超電導限流器とを組み合わせ、これらを S N 転移温度（臨界温度）以下の温度に保持するための冷却システムが開示されている。超電導限流器は、超電導状態が破れて常電導状態に移した時発生する電気抵抗を利用して電流を抑制する装置である。特許文献 2 には、超電導限流器を構成する超電導限流素子を冷却するための専用の冷凍機を備えた例が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献 1：国際公開第 9 9 / 6 2 1 2 7 号（図 3 5）

特許文献 2：特開 2 0 0 7 - 3 1 7 8 8 4 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 超電導ケーブルは、運転中臨界温度を超えないように臨界温度から安全幅をもたせた冷却温度に冷却されている。他方、超電導限流器を構成する超電導限流素子は、超電導ケーブルに定格電流以上の短絡電流が発生した時、超電導限流素子が即座に移して短絡電流を抑制する必要があるために、臨界

温度に近い温度に冷却されている。このように、両者は冷却温度が異なるために、通常、両者を組み合わせて使用する場合でも、夫々専用の冷凍機を設けざるを得ないと考えられている。そのため、冷却システムが複雑かつ高コストとなるおそれがある。

[0006] 本開示は、上述する問題点に鑑みてなされたもので、超電導ケーブル及び超電導限流器を組合せ使用する場合に、超電導ケーブル及び超電導限流器を夫々に適した温度で超電導状態に冷却しながら、冷却システムを低コスト化することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 上記目的を達成するため、本開示に係る冷却システムは、超電導ケーブルおよび該超電導ケーブルに電氣的に接続された超電導限流器の冷却システムであって、冷凍機と、前記冷凍機で冷却された第1冷媒を前記超電導ケーブルに供給して前記冷凍機に戻すための循環路と、前記循環路から分岐し前記超電導ケーブルをバイパスして前記超電導限流器を経由するように設けられた分岐路と、前記分岐路上に設けられ、前記超電導限流器で気化した第2冷媒を前記第1冷媒で冷却して凝縮させるための凝縮器と、を備える。

[0008] また、本開示に係る冷却システムの制御方法は、超電導ケーブルおよび該超電導ケーブルに電氣的に接続された超電導限流器の冷却システムであって、冷凍機と、前記冷凍機で冷却された第1冷媒を前記超電導ケーブルに供給して前記冷凍機に戻すための循環路と、前記循環路から分岐し前記超電導ケーブルをバイパスして前記超電導限流器を経由するように設けられた分岐路と、前記分岐路上に設けられ、前記超電導限流器で気化した第2冷媒を前記第1冷媒で冷却して凝縮させるための凝縮器と、を備え、前記凝縮器は、前記超電導限流器に含まれる超電導限流素子を冷却するための前記第2冷媒が貯留される冷媒タンクの気相部又は該気相部に連通する空間に配置され、前記凝縮器で液化された凝縮液を前記冷媒タンクの液相部に戻すための液戻し流路を備える冷却システムの制御方法であって、前記冷媒タンクの気相部又は該気相部に連通する空間の圧力値を検出する圧力検出ステップと、前記圧

力値に応じて前記凝縮器に流入する前記第1冷媒の流量を制御する流量制御ステップと、を備える。

発明の効果

[0009] 本開示に係る冷却システムによれば、超電導ケーブル及び超電導限流器を組合せ使用する場合に、超電導限流器専用の冷凍機が不要となるため、冷却システムを簡素化かつ低コスト化できると共に、超電導ケーブル及び超電導限流器を夫々に適した温度で超電導状態に冷却することができる。また、本開示に係る冷却システムの制御方法によれば、超電導限流器の冷却温度を転移温度に近い温度に制御できるため、超電導ケーブルに定格電流以上の短絡電流が流れた時の超電導限流器の応答性を高めることができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]超電導ケーブル及び超電導限流器を組み合せ使用した一実施形態に係る電力ケーブルシステムを示す系統図である。

[図2]一実施形態に係る超電導限流器の冷却システムの断面図である。

[図3]一実施形態に係る超電導限流器の冷却システムの断面図である。

[図4]一実施形態に係る超電導限流器の冷却システムの制御方法の工程図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、添付図面を参照して本発明の幾つかの実施形態について説明する。ただし、実施形態として記載され又は図面に示されている構成部品の寸法、材質、形状、その相対的配置等は、本発明の範囲をこれに限定する趣旨ではなく、単なる説明例にすぎない。

例えば、「ある方向に」、「ある方向に沿って」、「平行」、「直交」、「中心」、「同心」或いは「同軸」等の相対的或いは絶対的な配置を表す表現は、厳密にそのような配置を表すのみならず、公差、若しくは、同じ機能が得られる程度の角度や距離をもって相対的に変位している状態も表すものとする。

例えば、「同一」、「等しい」及び「均質」等の物事が等しい状態である

ことを表す表現は、厳密に等しい状態を表すのみならず、公差、若しくは、同じ機能が得られる程度の差が存在している状態も表すものとする。

例えば、四角形状や円筒形状等の形状を表す表現は、幾何学的に厳密な意味での四角形状や円筒形状等の形状を表すのみならず、同じ効果が得られる範囲で、凹凸部や面取り部等を含む形状も表すものとする。

一方、一つの構成要素を「備える」、「具える」、「具備する」、「含む」、又は「有する」という表現は、他の構成要素の存在を除外する排他的な表現ではない。

[0012] 図1は、一実施形態に係る冷却システム10の系統図である。冷却システム10は、超電導ケーブル12と、超電導ケーブル12の端末14に電氣的に接続された超電導限流器16とを組み合わせ用いる電力ケーブルシステムに適用されるものであり、超電導ケーブル12及び超電導限流器16を夫々の冷却温度に適した超電導状態に冷却するための冷却システムである。冷却システム10は、循環路18及び分岐路22を備え、循環路18に冷凍機20及び冷媒ポンプ26が設けられ、冷凍機20によって超電導ケーブル12の冷却温度に適した極低温に冷却された冷媒r1（第1冷媒）が、冷媒ポンプ26によって循環路18及び分岐路22を循環する。

[0013] 循環路18は、端末14から超電導ケーブル12内を超電導ケーブル12の軸線方向に沿って形成された往路18（18a）と、超電導ケーブル12の他端で超電導ケーブル12から分離し、冷凍機20まで戻る復路18（18b）とを含む。冷凍機20で冷却された冷媒r1が往路18（18a）を流れ、超電導ケーブル12をSN転移温度未満の温度に冷却して超電導状態に保持する。分岐路22は、超電導ケーブル12の上流側で循環路18から分岐し、超電導限流器16を経由し、超電導ケーブル12をバイパスして冷凍機20に戻るよう配置されている。

[0014] 図2及び図3は、冷却システム10において、幾つかの実施形態に係る超電導限流器16の冷却システムを示す断面図である。図2又は図3に示すように、分岐路22には、超電導限流器16の冷却システムを構成する凝縮器

30 (30a、30b) が設けられている。超電導限流器16の冷却に用いられる冷媒r2 (第2冷媒) は、超電導限流器16を臨界温度に近い温度に冷却するため、例えば大気圧下において沸点に近い温度を有する。従って、冷媒r2は超電導限流器16の作動中一部が蒸発する。凝縮器30は、超電導限流器16で気化した冷媒r2を冷媒r1と熱交換させて冷却し再凝縮する。

[0015] 超電導限流器16は、超電導限流素子50と、超電導限流素子50を冷却するための冷媒r2が貯留された冷媒タンク52とを備えている。超電導限流素子50は、冷媒タンク52に貯留された冷媒r2に浸漬されている。超電導ケーブル12は、臨界温度を超えないように、冷媒r1によって臨界温度から安全幅をもたせた低温に保持される。一方、超電導限流器16は、超電導ケーブル12に定格電流以上の短絡電流が発生した時、即座に短絡電流を遮断するために、冷媒r2によって臨界温度に近い温度に冷却される。従って、両者の冷却温度は異なる。

[0016] 上記実施形態によれば、凝縮器30において、冷媒タンク52で蒸発した冷媒r2を冷媒r1で冷却して再凝縮させ、再凝縮した冷媒r2を超電導限流器16の冷却に供するため、超電導限流器16を冷却するための専用の冷凍機を必要としない。また、冷媒r2の気相部Gは飽和状態であるので、冷媒r2の気相部Gの圧力 (飽和圧力) を制御することで、一義的に冷媒r2の液相部Lの温度 (飽和温度) を制御できる。冷媒r2の液相部Lの温度を制御することができるので、冷媒r2によって冷却される超電導限流素子50を臨界温度に近い温度に冷却できる。こうして、超電導ケーブル12及び超電導限流器16の冷却温度が異なるのに拘わらず、超電導限流素子50を冷却するための冷凍機は不要となり、超電導ケーブル12を冷却するための1個の冷凍機だけで、超電導ケーブル12及び超電導限流器16を夫々に適した冷却温度に冷却できる。

[0017] 例えば、冷媒r1及び冷媒r2として液体窒素が用いられる。冷凍機20によって超電導ケーブル12及び凝縮器30に、例えば超電導ケーブル12

の冷却温度に合わせた 67 K の液体窒素が供給される。超電導限流器 16 が大気圧に保持される場合、冷媒 r2 の液相部 L は液体窒素の沸点である 77 K 近くの温度に制御される。

[0018] 一実施形態では、図 1 に示すように、超電導限流器 16 は超電導ケーブル 12 の端末 14 に電氣的に接続されると共に、送電設備 24 などの電力系統に電氣的に接続される。

[0019] 一実施形態では、図 1 に示すように、循環路 18 に、超電導ケーブル 12 及び超電導限流器 16 を通過した後の冷媒 r1 を回収するためのリザーバ 28 が設けられる。超電導ケーブル 12 に定格電流以上の短絡電流が流れたとき、超電導限流器 16 に含まれる超電導限流素子 50 が転移し、電氣的抵抗が生じて加熱される。超電導限流素子 50 の温度上昇によって生じる冷媒 r2 の圧力上昇に対して、凝縮器 30 に流入する冷媒 r1 の流量を増大させて、冷媒 r2 の温度上昇を防いでいる。この場合でも、本実施形態ではリザーバ 28 を備えているため、超電導ケーブル 12 を通過してリザーバ 28 に流入する冷媒 r1 の流量や流体圧力に影響されず、冷却負荷に必要な冷媒 r1 の流量を凝縮器 30 からリザーバ 28 に戻すことができる。

[0020] 一実施形態では、リザーバ 28 は循環路 18 と分岐路 22 との合流点に設けられる。そして、分岐路 22 の冷媒 r1 はリザーバ 28 の気相部に戻される。仮に、リザーバ 28 の上流側で循環路 18 と分岐路 22 とが合流すると、冷媒 r1 の流量が多い循環路 18 から分岐路 22 に冷媒 r1 が逆流するおそれがある。この実施形態によれば、循環路 18 及び分岐路 22 はリザーバ 28 に接続され、分岐路 22 はリザーバ 28 の気相部に戻されるため、そのおそれはない。

[0021] 一実施形態では、図 2 又は図 3 に示すように、凝縮器 30 (30a、30b) は、冷媒 r2 が貯留される冷媒タンク 52 の気相部 G 又は気相部 G に連通する空間 S に配置される。図 2 に示す実施形態では、凝縮器 30 (30a) は、冷媒タンク 52 の気相部 G に配置され、図 3 に示す実施形態では、凝縮器 30 (30b) は気相部 G に連通する空間 S に配置されている。さらに

、凝縮器 30 で液化された冷媒 r 2 の凝縮液を冷媒タンク 52 の液相部 L に戻すための液戻し流路 32 を備えている。

[0022] 超電導限流器 16 は、超電導状態から常電導状態に転移した時、速やかに超電導状態に復帰する必要がある、復帰する際には瞬間的に冷却負荷が高まる。従って、超電導限流器 16 を速やかに復帰させるためには、凝縮器 30 で気化した冷媒 r 2 の再凝縮を効率良く行う必要がある。本実施形態によれば、凝縮器 30 で再凝縮した冷媒 r 2 は液戻し流路 32 を通って速やかに冷媒タンク 52 に戻されるため、冷媒 r 2 の再凝縮を効率的に行うことができる。

[0023] なお、図 2 に示す実施形態では、凝縮器 30 (30a) は冷媒タンク 52 の気相部 G に配置されているので、凝縮器 30 (30a) で再液化した凝縮液は重力により気相部 G から直接液相部 L の液面に落下する。従って、この実施形態では、液戻し流路 32 は気相部 G に形成されているとみなすことができる。凝縮器 30 (30a) は、気相部 G に配置されるため、ハウジングなどを必要とせず、従って、凝縮器 30 (30a) を簡素化かつ低コスト化できる。

[0024] 一実施形態では、図 3 に示すように、凝縮器 30 (30b) は冷媒タンク 52 の上方に配置されている。そして、液戻し流路 32 は、凝縮器 30 (30b) で凝縮した凝縮液を冷媒タンク 52 の液相部 L に滴下させるように構成される。凝縮器 30 (30b) で凝縮した冷媒 r 2 の凝縮液は、液戻し流路 32 を介して重力で自動的に冷媒タンク 52 の液相部 L に滴下する。そのため、再凝縮した冷媒 r 2 を冷媒タンク 52 に戻す動力が不要になる。

[0025] 一実施形態では、図 3 に示すように、凝縮器 30 (30b) は、冷媒タンク 52 の上方に設けられたハウジング 34 を備えている。そして、液戻し流路 32 として、ハウジング 34 の内部と冷媒タンク 52 の内部とを連通させる連通管 35 を備え、連通管 35 の下端部 35a は冷媒タンク 52 の天井面 54 よりも下方へ突出するように構成されている。凝縮器 30 (30b) で再凝縮した冷媒 r 2 は連通管 35 を伝って下端部 35a まで落下するため、

再凝縮した冷媒 r_2 は、気相部 G に触れることなく液相部 L の液面近傍まで移動する。これによって、落下途中での再蒸発を抑制できる。連通管 35 の下端部 $35a$ が冷媒タンク 52 の天井面 54 よりも下方へ突出するように構成されていないとき、凝縮液が落下途中で再気化するおそれがある。

[0026] 図3に示す凝縮器 30 ($30b$) は、連通管 35 を介して冷媒タンク 52 の上面より上方に配置されているが、別な実施形態では、ハウジング 34 を冷媒タンク 52 の上面に接して載置するように配置してもよい。

[0027] 一実施形態では、図2及び図3に示すように、凝縮器 30 ($30a$ 、 $30b$) は、冷媒 r_1 と冷媒 r_2 とを熱交換する熱交換器 36 を備え、さらに、熱交換器 36 に供給される冷媒 r_1 の流量を制御する流量調整弁 38 を備えている。この実施形態では、流量調整弁 38 の開度を制御することで、熱交換器 36 に供給される冷媒 r_1 の流量を制御できるため、冷媒 r_1 と熱交換される冷媒 r_2 の凝縮量を制御できる。冷媒タンク 52 は密閉構造を有する容器であり、冷媒タンク 52 の内部は飽和状態になっている。従って、冷媒 r_2 の再凝縮量を制御することで、冷媒タンク 52 の飽和圧力を制御できる。該飽和圧力を制御することで該飽和圧力から一義的に対応する飽和温度を制御できる。これによって、冷媒 r_2 を超電導限流素子 50 の冷却に適した温度に制御できる。

[0028] 図2及び図3に示す実施形態では、熱交換器 36 は、冷媒タンク 52 の気相部 G 又は連通空間 S に設けられた熱交換管で構成されている。該熱交換管の内部を冷媒 r_1 が流れ、該熱交換管の外側は冷媒 r_2 の気相部が形成され、冷媒 r_1 と冷媒 r_2 とは該熱交換管を介して間接熱交換される。そのため、気相部 G 又は連通空間 S は密閉空間を形成でき、飽和状態を保つことができる。

[0029] 図2又は図3に示す実施形態では、流量調整弁 38 は凝縮器 30 の上流側の分岐路 22 に設けられているが、代わりに、凝縮器 30 の下流側の分岐路 22 に設けるようにしてもよい。

また、一実施形態では、図1～図3に示すように、循環路 18 及び分岐路

22を構成する配管は、外側から熱が侵入しないように、断熱層44で被覆されている。また、冷媒タンク52の内部に貯留した液相部Lの液面は液面計56によって検出できる。これによって、液相部Lの冷媒液量の把握が可能になる。

[0030] 一実施形態では、図2又は図3に示すように、冷媒タンク52の気相部G又は凝縮器30(30b)の連通空間Sの圧力を検出するための圧力センサ40が設けられている。圧力センサ40の検出値は制御部42に送られ、制御部42は、圧力センサ40の検出値に基づいて流量調整弁38の開度を制御する。圧力センサ40の検出値に基づいて流量調整弁38の開度を制御することで、冷媒タンク52の気相部Gの圧力を所望の圧力に制御できる。これによって、冷媒r2を超電導限流素子50の冷却に適した温度に精度良く制御できる。

[0031] 一実施形態では、制御部42は、冷媒r2による超電導限流素子50の冷却温度を転移温度に近い設定範囲内温度に制御するように構成される。これによって、超電導ケーブル12に定格電流以上の短絡電流が流れた時の超電導限流器16の応答性を高めることができる。

[0032] 一実施形態に係る冷却システム10の制御方法は、図4に示すように、まず、冷媒タンク52の気相部G又は連通空間Sの圧力値を検出する(圧力検出ステップS10)。次に、検出した圧力値に応じて凝縮器30に流入する冷媒r1の流量を制御する(流量制御ステップS12)。冷媒タンク52の気相部G又は連通空間Sを目標圧力とすることができるので、冷媒タンク52の液相部Lによって超電導限流素子50の冷却温度を転移温度に近い温度に制御できる。これによって、超電導ケーブル12に定格電流以上の短絡電流が流れた時の超電導限流器16の応答性を高めることができる。

[0033] 冷媒タンク52の内部は冷媒r2が飽和状態に維持されている。一実施形態では、流量制御ステップS12において、冷媒タンク52内の冷媒r2が飽和状態下で冷却目標温度Tgに一義的に対応する目標圧力Pgとなるように、凝縮器30に流入する冷媒r1の流量を制御する。制御パラメータとし

て制御しやすい冷媒タンク 52 内の冷媒 r 2 の圧力を対象とし、冷媒 r 2 の圧力が目標圧力 P_g となるように、凝縮器 30 に流入する冷媒 r 1 の流量を制御するので、目標圧力 P_g に一義的に対応する冷媒 r 2 の冷却目標温度 T_g に精度良く制御できる。

[0034] 図 4 は、図 2 又は図 3 に示す実施形態において、流量調整弁 38 の開度制御によって気相部 G 又は連通空間 S の圧力を制御する方法の一例を説明する。なお、図 4 において、符号 V は流量調整弁 38 の開度 (%) を示す。この制御例では、気相部 G 又は連通空間 S の目標圧力 P_g を圧力幅 $P_1 \sim P_2$ の範囲内としている。

ここで圧力制御の目的は、超電導限流器 16 に含まれる超電導限流素子 50 を冷却するために貯留される冷媒 r 2 の液温を、冷却目標温度 T_g に冷却することにある。冷媒 r 2 の冷却目標温度 T_g を $T_1 \leq \text{冷却目標温度 } T_g \leq T_2$ の範囲内とすると、飽和圧力に相当する圧力値の目標圧力 P_g は $P_1 \leq \text{目標圧力 } P_g \leq P_2$ の範囲内とすることができる。温度 T_1 は冷却目標温度 T_g の下限値であり、圧力 P_1 は飽和状態下で温度 T_1 に一義的に対応する圧力である。また、温度 T_2 は冷却目標温度 T_g の上限値であり、圧力 P_2 は飽和状態下で温度 T_2 に一義的に対応する圧力である。

[0035] なお、図 4 において、圧力センサ 40 の検出値 P 、目標圧力 P_g (圧力幅 $P_1 \sim P_2$) 及び制御時の圧力値 P_1 、 P_2 の関係、及び流量調整弁 38 の開度 V (%) の範囲は、次のとおりである。

$$\text{目標圧力} : P_1 \leq P_g \leq P_2$$

$$\text{目標圧力を下回る条件} : P < P_1$$

$$\text{目標圧力を上回る条件} : P_2 < P$$

$$0 \leq V \leq 100$$

[0036] まず、圧力センサ 40 により気相部 G 又は連通空間 S の圧力値 P を検出する (ステップ S10)。次に、圧力値 P が目標圧力 P_g (圧力幅 $P_1 \sim P_2$) を下回って減少したとき ($P < P_1$) (ステップ 12a)、冷媒 r 2 の圧力が降下して冷媒 r 2 の液温が低いので、流量調整弁 38 の開度 V を減少さ

せ、凝縮器 30 に流入する冷媒 r_1 の流量を低減させる（ステップ S 14 a）。圧力値 P が目標圧力 P_g の範囲（ $P_1 \leq P_g \leq P_2$ ）内で安定しているとき（ステップ S 12 b）、流量調整弁 38 の開度 V は一定のまま変化させない（ステップ S 14 b）。圧力値 P が増加したとき（ $P_2 < P$ ）（ステップ S 12 c）、冷媒 r_2 の圧力上昇で冷媒 r_2 の液温が高くなるので、流量調整弁 38 の開度 V を増加させ、凝縮器 30 に流入する冷媒 r_1 の流量を増加させる（ステップ S 14 c）。このような操作を行うことで、気相部 G 又は連通空間 S の圧力を目標圧力 P_g に保持できる。また、目標圧力 P_g を大気圧付近に設定することができる。

[0037] 上記各実施形態に記載の内容は、例えば以下のように把握される。

[0038] （１）一つの態様に係る冷却システム（１０）は、超電導ケーブル（１２）及び該超電導ケーブルに電氣的に接続された超電導限流器（１６）の冷却システムであって、冷凍機（２０）と、前記冷凍機で冷却された第１冷媒（ r_1 ）を前記超電導ケーブル（１２）に供給して前記冷凍機（２０）に戻すための循環路（１８）と、前記循環路（１８）から分岐し前記超電導ケーブル（１２）をバイパスして前記超電導限流器（１６）を経由するように設けられた分岐路（２２）と、前記分岐路（２２）上に設けられ、前記超電導限流器（１６）で気化した第２冷媒（ r_2 ）を前記第１冷媒（ r_1 ）で冷却して凝縮させるための凝縮器（３０）と、を備える。

[0039] このような構成によれば、上記凝縮器で蒸発した第２冷媒を第１冷媒で冷却して再凝縮するため、第２冷媒を冷却するための冷凍機を必要としない。また、第２冷媒の気相部は飽和状態であるので、第２冷媒の気相部の飽和圧力を制御することで、第２冷媒の温度（飽和温度）を制御できる。従って、凝縮器に供給する第１冷媒の流量制御と、第２冷媒の気相部の圧力制御とによって、第２冷媒の液相部を所望の温度に調整できる。これによって、第２冷媒によって冷却される超電導限流素子を臨界温度に近い温度に冷却できる。こうして、超電導ケーブルと超電導限流器とを組合せて使用する場合に、超電導ケーブルを冷却するための１個の冷凍機だけで、超電導ケーブル及び

超電導限流器を夫々に適した冷却温度に冷却できる。

[0040] (2) 別な態様に係る冷却システム(10)は、(1)に記載の冷却システムであって、前記循環路(18)に設けられ、前記超電導ケーブル(12)及び前記超電導限流器(16)を通過した後の前記第1冷媒(r1)を回収するためのリザーバ(28)を備える。

[0041] 超電導ケーブルに定格電流以上の短絡電流が流れたとき、超電導限流器に含まれる超電導限流素子が転移し、電氣的抵抗が生じて加熱される。これによって、第2冷媒の圧力が上昇するが、この場合、凝縮器に流入する第1冷媒の流量を増大させて、第2冷媒の温度上昇を防いでいる。この場合でも、上記構成によれば、超電導ケーブルを通過してリザーバに流入する第1冷媒の流量や流体圧力に影響されず、超電導ケーブルの冷却負荷に必要な第1冷媒量を凝縮器からリザーバに戻すことができる。

[0042] (3) さらに別な態様に係る冷却システム(10)は、(1)又は(2)に記載の冷却システムであって、前記凝縮器(30)は、前記超電導限流器(16)に含まれる超電導限流素子(50)を冷却するための前記第2冷媒(r2)が貯留される冷媒タンク(52)の気相部(G)又は該気相部(G)に連通する空間(S)に配置され、前記凝縮器(30)で液化された凝縮液を前記冷媒タンク(52)の液相部(L)に戻すための液戻し流路(32)と、を備える。

[0043] このような構成によれば、超電導限流器の作動中、超電導限流素子からの受熱で一部が蒸発し、凝縮器で再凝縮した第2冷媒は上記液戻し流路を通過して速やかに冷媒タンクに戻されるため、第2冷媒の再凝縮を効率的に行うことができる。

[0044] (4) さらに別な態様に係る冷却システム(10)は、(3)に記載の冷却システムであって、前記凝縮器(30)は前記冷媒タンク(52)の上方に配置され、前記液戻し流路(32)は、前記凝縮液を前記冷媒タンク(52)の前記液相部(L)に滴下させるように構成される。

[0045] このような構成によれば、凝縮器が冷媒タンクの上方に配置されるため、

再凝縮した第2冷媒は重力で冷媒タンクの液相部に自動的に戻る。そのため、再凝縮した第2冷媒を冷媒タンクに戻すための動力が不要になる。

[0046] (5) さらに別な態様に係る冷却システム(10)は、(4)に記載の冷却システムであって、前記凝縮器(30(30b))は、前記冷媒タンク(52)の上方に設けられたハウジング(34)と、前記ハウジングと前記冷媒タンク(52)との間を連通させる連通管(35)と、を備え、前記連通管(35)の下端(35a)が前記冷媒タンク(52)の天井面(54)よりも下方へ突出するように構成される。

[0047] このような構成によれば、凝縮器で再凝縮した第2冷媒は、上記連通管を伝って冷媒タンクに貯留された第2冷媒の液相部の液面近傍で落下することができる。このように、上記連通管を伝うことで、第2冷媒の気相部との接触を極力避けることができ、落下途中での再蒸発を抑制できる。

[0048] (6) さらに別な態様に係る冷却システム(10)は、(3)乃至(5)の何れかに記載の冷却システムであって、前記凝縮器(30)は、前記第1冷媒(r1)と前記第2冷媒(r2)とを熱交換する熱交換器(36)を含み、前記熱交換器(36)に供給される前記第1冷媒(r1)の流量を制御する流量調整弁(38)を備える。

[0049] このような構成によれば、上記熱交換器に供給される第1冷媒の流量を上記流量調整弁で制御することで、凝縮器における第2冷媒の再凝縮量を制御できる。第2冷媒の再凝縮量を制御することで、飽和状態にある冷媒タンク内の圧力を制御でき、これによって、第2冷媒の飽和温度を制御できるため、第2冷媒を超電導限流素子の冷却に適した温度に精度良く制御できる。

[0050] (7) さらに別な態様に係る冷却システム(10)は、(6)に記載の冷却システムであって、前記冷媒タンク(52)の前記気相部(G)又は前記気相部(G)に連通する前記空間(S)の圧力を検出するための圧力センサ(40)と、前記圧力センサ(40)の検出値に基づいて前記流量調整弁(38)の開度を制御する制御部(42)と、を備える。

[0051] このような構成によれば、上記圧力センサで冷媒タンクの気相部の飽和圧

力を検出し、この検出値に基づいて流量調整弁の開度を制御することで、第2冷媒を超電導限流素子の冷却に適した温度に精度良く制御できる。

[0052] (8) さらに別な態様に係る冷却システム(10)は、(7)に記載の冷却システムであって、前記制御部(42)は、前記第2冷媒(r2)による前記超電導限流器(16)の冷却温度を転移温度に近い設定範囲内温度に制御するように構成される。

[0053] このような構成によれば、前記超電導限流器の冷却温度を設定範囲内温度に制御することで、超電導ケーブルに定格電流以上の短絡電流が流れた時の超電導限流器の応答性を高めることができる。

[0054] (9) 本開示に係る冷却システムの制御方法は、超電導ケーブル(12)および該超電導ケーブル(12)に電氣的に接続された超電導限流器(16)の冷却システムであって、冷凍機(20)と、前記冷凍機(20)で冷却された第1冷媒(r1)を前記超電導ケーブル(12)に供給して前記冷凍機(20)に戻すための循環路(18)と、前記循環路(18)から分岐し前記超電導ケーブル(12)をバイパスして前記超電導限流器(16)を経由するように設けられた分岐路(22)と、前記分岐路(22)上に設けられ、前記超電導限流器(16)で気化した第2冷媒(r2)を前記第1冷媒(r1)で冷却して凝縮させるための凝縮器(30)と、を備え、前記凝縮器(30)は、前記超電導限流器(16)に含まれる超電導限流素子(50)を冷却するための前記第2冷媒(r2)が貯留される冷媒タンク(52)の気相部(G)又は該気相部(G)に連通する空間(S)に配置され、前記凝縮器(30)で液化された凝縮液を前記冷媒タンク(52)の液相部(L)に戻すための液戻し流路(32)を備える冷却システムの制御方法であって、前記冷媒タンク(52)の気相部(G)又は該気相部(G)に連通する空間(S)の圧力値を検出する圧力検出ステップ(S10)と、前記圧力値に応じて前記凝縮器に流入する前記第1冷媒の流量を制御する流量制御ステップ(S12)と、を備える。

[0055] このような構成によれば、冷媒タンクの気相部又は該気相部に連通する空

間を目標圧力とすることができるので、冷媒タンクの液相部によって超電導限流素子の冷却温度を転移温度に近い温度に制御できる。これによって、超電導ケーブルに定格電流以上の短絡電流が流れた時の超電導限流器の応答性を高めることができる。

[0056] (10) 一態様に係る冷却システムの制御方法は、(9)に記載の冷却システムの制御方法であって、前記冷媒タンク(52)の内部は前記第2冷媒(r2)が飽和状態に維持され、前記流量制御ステップ(S12)において、前記冷媒タンク(52)内の前記第2冷媒(r2)が冷却目標温度 T_g に一義的に対応する目標圧力 P_g となるように、前記凝縮器(30)に流入する前記第1冷媒(r1)の流量を制御する。

[0057] このような構成によれば、制御パラメータとして制御しやすい冷媒タンク内の第2冷媒の圧力を対象とし、該圧力が目標圧力 P_g となるように、凝縮器に流入する第1冷媒の流量を制御するので、目標圧力 P_g に一義的に対応する第2冷媒の冷却目標温度 T_g に精度良く制御できる。

符号の説明

[0058]

10	冷却システム
12	超電導ケーブル
14	端末
16	超電導限流器
18	循環路
20	冷凍機
22	分岐路
24	送電設備
26	冷媒ポンプ
28	リザーバ
30 (30a、30b)	凝縮器
32	液戻し流路
34	ハウジング

- 3 5 連通管
 - 3 5 a 下端部
- 3 6 熱交換器
- 3 8 流量調整弁
- 4 0 圧力センサ
- 4 2 制御部
- 4 4 断熱層
- 5 0 超電導限流素子
- 5 2 冷媒タンク
- 5 4 天井面
- 5 6 液面計
- r 1 冷媒（第 1 冷媒）
- r 2 冷媒（第 2 冷媒）
- G 気相部
- L 液相部
- S 連通空間