(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101681981 B
(45)授权公告日 2013.08.21

(21)申请号 200880011215.6
(22)申请日 2008.01.29
(30)优先权数据
11/673,281 2007.02.09 US
11/688,817 2007.03.20 US
11/688,827 2007.03.20 US
11/688,802 2007.03.20 US
(85)PCT申请进入国家阶段日
2009.10.09
(86)PCT申请的申请数据
PCT/US2008/052290 2008.01.29
(87)PCT申请的公布数据
WO2008/097759 EN 2008.08.14
(73)专利权人 美国超导公司
地址 美国马萨诸塞州
(72)发明人 D·C·弗尔兹 J·马圭尔 J·袁 A·P·马洛莫夫
(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100
代理人 陈亮
(51)Int.Cl.
H01L 39/14(2006.01)
H01L 39/16(2006.01)
H01B 12/02(2006.01)
H02H 9/02(2006.01)
(56)对比文件
CN 1813317 A,2006.08.02,
WO 2007/015924 A1,2007.02.08,
US 2006/0073979 A1,2006.04.06,
审查员 王丹

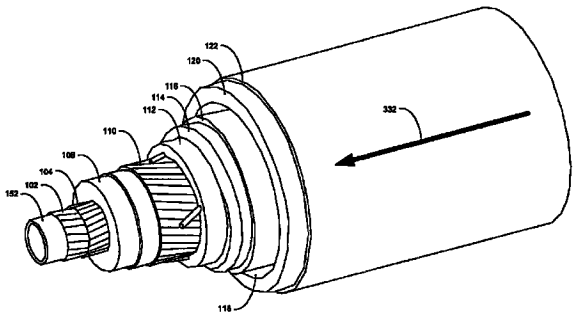
权利要求书3页 说明书19页 附图8页

(54)发明名称

故障电流限制高温超导电缆及其配置方法

(57)摘要

一种低温冷却HTS电缆被配置为包含在公用事业电网内,所述公用事业电网具有在没有所述低温冷却HTS电缆的情况下将发生的最大故障电流。所述低温冷却HTS电缆包括用于使液体致冷剂循环的连续液体低温冷却剂路径。HTS导线的连续挠性布置具有使所述最大故障电流衰减至少10%的阻抗特性。所述HTS导线的连续挠性布置被配置为允许所述低温冷却HTS电缆在发生所述最大故障条件期间在HTS导线内以最大温升工作,所述最大温升低到足以防止在所述液体致冷剂内形成气泡。



CN 101681981 B

1. 一种低温冷却高温超导(high temperature superconducting ;HTS)电缆,被配置为包含在公用事业电网内,所述公用事业电网具有在缺乏所述低温冷却 HTS 电缆的情况下将发生的最大故障电流,所述低温冷却 HTS 电缆包括 :

连续的液体低温冷却剂路径,用于使液体致冷剂循环 ;

内冷却剂通道位于所述低温冷却 HTS 电缆内,所述内冷却剂通道上缠绕有第一 HTS 层和第二 HTS 层,所述第一 HTS 层和所述第二 HTS 层中包括稳定剂,所述稳定剂具有为 100-600 微米的相当厚的总厚度,所述稳定剂具有为 0.8-15 微欧 - 厘米的相当高的电阻率 ;以及

HTS 导线的连续挠性布置,具有使所述最大故障电流衰减至少 10% 的阻抗特性,通过配置所述 HTS 导线中的一根或多根的一个或多个设计参数来定义故障条件期间的阻抗特性和最高温升,所述 HTS 导线的连续挠性布置被配置为允许所述低温冷却 HTS 电缆在发生最大故障条件期间在所述 HTS 导线内以最大温升工作,所述最大温升低到足以防止在所述液体致冷剂内形成气泡。

2. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆,还包括 :

连续挠性缠绕支撑结构,其中所述 HTS 导线中的一根或多根相对于所述连续挠性缠绕支撑结构同轴地定位。

3. 如权利要求 2 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述连续挠性缠绕支撑结构包括空心轴向芯。

4. 如权利要求 2 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述连续挠性缠绕支撑结构包括波纹不锈钢管。

5. 如权利要求 2 所述的低温冷却 HTS 电缆,还包括 :

一个或多个导电层 ;

屏蔽层,相对于所述连续挠性缠绕支撑结构同轴地定位 ;以及

绝缘层,相对于所述连续挠性缠绕支撑结构同轴地定位并位于所述一个或多个导电层与所述屏蔽层之间。

6. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述液体致冷剂是液氮。

7. 如权利要求 6 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述液氮被加压至大气压力以上并被过冷至 77K 以下。

8. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述液体致冷剂是液氢。

9. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述低温冷却 HTS 电缆包括一根或多根 HTS 导线。

10. 如权利要求 5 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述 HTS 导线至少其中之一由选自由以下各项组成的组的 HTS 材料构成 :稀土钡铜氧化物 ;铊钡钙铜氧化物 ;铋锶钙铜氧化物 ;汞钡钙铜氧化物 ;以及二硼化镁。

11. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述稳定剂层具有在 200 ～ 500 微米范围内的总稳定剂厚度和在 90° K 下在 1 ～ 10.0 微欧 - 厘米范围内的电阻率。

12. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆,其特征在于,所述稳定剂具有为 100-600 微米的相当厚的总厚度,所述稳定剂具有为 0.8-15 微欧 - 厘米的相当高的电阻率,所述一个或多个设计参数包括以下各项中的一个或多个 :稳定剂电阻率因数 ;稳定剂厚度因数 ;

导线比热因数；以及工作临界电流密度因数。

13. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆，还包括：

一个或多个高速开关，与所述低温冷却 HTS 电缆并联地耦合，其中所述一个或多个高速开关被配置为在故障条件开始之后断开。

14. 如权利要求 1 所述的低温冷却 HTS 电缆，其特征在于，所述低温冷却 HTS 电缆被配置为在链接多个变电站的母联（bus-tie）应用中使用。

15. 一种配置低温冷却 HTS 电缆的方法，包括：

确定所述低温冷却 HTS 电缆的最高容许工作温度，所述低温冷却 HTS 电缆包括挠性缠绕支撑结构与内冷却剂通道，所述挠性缠绕支撑结构被配置为支撑相对于所述挠性缠绕支撑结构同轴地定位的一个或多个超导材料导电层，所述内冷却剂通道位于所述低温冷却 HTS 电缆内，所述内冷却剂通道上缠绕有第一 HTS 层和第二 HTS 层，所述第一 HTS 层和所述第二 HTS 层中包括稳定剂，所述稳定剂具有为 100-600 微米的相当厚的总厚度，所述稳定剂具有为 0.8-15 微欧 - 厘米的相当高的电阻率；以及

配置所述低温冷却 HTS 电缆的一个或多个设计参数，以在发生最大故障条件期间，所述低温冷却 HTS 电缆的实际工作温度被维持在低于所述最高容许工作温度的水平，且最大故障电流被减小至少 10%。

16. 如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，最大容许工作温度实质上对应于在所述低温冷却 HTS 电缆的至少一部分内循环的制冷剂从液态变为气态时的温度。

17. 如权利要求 16 所述的方法，其特征在于，所述制冷剂是加压液氮。

18. 如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，所述稳定剂具有为 100-600 微米的相当厚的总厚度，所述稳定剂具有为 0.8-15 微欧 - 厘米的相当高的电阻率，所述 HTS 电缆包括 HTS 导线，所述一个或多个设计参数包括以下各项中的一个或多个：导线电阻率因数；稳定剂厚度因数；导线比热因数；故障电流持续时间因数；以及每单位宽度的导线工作临界电流因数。

19. 如权利要求 15 所述的方法，还包括：

确定所述低温冷却 HTS 电缆的所述实际工作温度。

20. 如权利要求 19 所述的方法，还包括：

将所述低温冷却 HTS 电缆的所述实际工作温度与所述低温冷却 HTS 电缆的所述最高容许工作温度相比较。

21. 如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，配置一个或多个设计参数包括：

调整所述低温冷却 HTS 电缆的阻抗。

22. 如权利要求 21 所述的方法，其特征在于，调整所述低温冷却 HTS 电缆的所述阻抗包括以下各项中的一个或多个：

将所述低温冷却 HTS 电缆的长度调整至最小值以上；

调整所述低温冷却 HTS 电缆的电阻率；

调整被结合到所述低温冷却 HTS 电缆内的 HTS 导线的稳定剂层的厚度；

借助于所述低温冷却 HTS 电缆中的密封剂来调整 HTS 导线的比热；以及

调整包括在所述低温冷却 HTS 电缆内的 HTS 导线的工作临界电流温度。

23. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于，所述稳定剂层至少部分地由黄铜材料构

成。

24. 如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，所述低温冷却 HTS 电缆包括一根或多根 HTS 导线，且其特征在于，所述 HTS 导线的至少其中之一由选自以下各项组成的群组的材料构成：稀土钡铜氧化物；铊钡钙铜氧化物；铋锶钙铜氧化物；汞钡钙铜氧化物；以及二硼化镁。

25. 如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，所述低温冷却 HTS 电缆被耦合到具有电压源阻抗的电压源，所述方法还包括：

确定所述电压源的所述电压源阻抗。

故障电流限制高温超导电缆及其配置方法

相关申请案交叉参考

[0001] 本申请案主张基于2007年3月20日提交的美国部分接续式专利申请案第11/688,802号的优先权，专利申请案第11/688,802号又主张基于2007年3月20日提交的美国部分接续式专利申请案第11/688,817号的优先权，专利申请案第11/688,817号则主张基于2007年3月20日提交的美国部分接续式专利申请案第11/688,827号的优先权，专利申请案第11/688,827号又主张基于2007年2月9日提交的美国专利申请案第11/673,281号的优先权。

技术领域

[0002] 本发明涉及高温超导(high temperature superconducting)装置，更具体而言，涉及被配置为充当故障电流限制装置的HTS装置。

背景技术

[0003] 随着全世界的电力需求持续显著增加，公用事业公司已在努力从发电的观点以及供电的观点出发满足这些日益增长的需求。由于现有安装的输配电基础设施的容量有限以及可用于增加附加传统输配电线路和电缆的空间有限，经由输配电网络向用户供电对公用事业公司仍是一项重要挑战。这在可用于扩展容量的现有空间非常有限之拥挤的城市和大都市区中尤其显著。

[0004] 目前，正在开发使用高温超导(HTS)导线的挠性长距离电力电缆以增加公用事业输配电网络的电力容量，同时保持相对小的占用面积以使安装更容易并使用对环境而言清洁的液氮进行冷却。对于本发明，将HTS材料定义为临界温度在30开氏度(-243摄氏度)或以上的超导体，其包括诸如稀土或钇钡铜氧化物(在本文中称为YBCO)；铊钡钙铜氧化物；铋锶钙铜氧化物(在本文中称为BSCCO)；汞钡钙铜氧化物；以及二硼化镁等材料。YBCO的临界温度约为90K。BSCCO的临界温度当为一种组成时约为90K且当为第二组成时约为110K。MgB_2的临界温度达到约40K。应理解，这些组合物家族包括可能的替代物、添加物和杂质，只要这些替代物、添加物和杂质的临界温度不降低至低于30° K即可。此类HTS电缆允许在公用事业电力网络的拥挤区域内经济且可靠地提供更多的电量，从而减缓拥挤度并使公用事业公司能够解决其输配电容量问题。

[0005] HTS电力电缆使用HTS导线作为用于输配电的电缆的主要导体(即代替传统的铜导体)。与传统架空线路和地下电缆相比，HTS电缆的设计在其超导工作状态下得到明显降低的串联阻抗。这里，电缆或线路的串联阻抗是指载送电力的导体的电阻阻抗和与电缆架构或架空线路相关的电抗(电感)阻抗。对于相同横截面积的电缆，HTS导线使得载流容量与传统交流(alternating current AC)电缆相比增加三至五倍；与传统直流(direct current；DC)电缆相比增加高达十倍。

[0006] HTS电缆可以设计为具有以螺旋形式缠绕在连续挠性波纹成形体(corrugated former)周围的HTS导线，或者其可以具有成各种堆叠和扭转配置的多根HTS导线。在所有

这些情况下，电缆均可以是连续挠性的，以便其可以方便地缠绕在卷筒 (drum) 上进行运输并弯弯曲曲地安装在管道中或其它电力装置之间。HTS 电缆可以设计为具有与 HTS 导线接触并沿着电缆的长度流动的液体致冷剂。液氮是最常用的液体致冷剂，但对于如二硼化镁等低温超导材料，可以使用液氢或液氖。

[0007] 除容量问题之外，由于增加的电力需求（以及由此引起的发电及通过输配电网络传输的功率水平的增加）而对公用事业公司引起的另一个严重问题是由于“故障”而引起的“故障电流”。故障可以起因于网路装置故障、自然事件（例如雷电）、人为事件（例如汽车事故撞断电线杆）、或会导致对地短路或从公用事业网络的相间短路的任何其它网络问题。一般而言，此类故障表现为立即体现在公用事业网络上的极大负载。响应于此负载的出现，网络试图向该负载输送大量的电流（即故障）。电网的网络中的任何给定链路 (link) 均可由最大故障电流来表征，在导致最大故障条件的短路期间在没有故障电流限制措施的情况下将流过该最大故障电流。在大型电网中，故障电流可能非常大，以致于在没有故障电流限制措施的情况下，电网中的大部分电气设备可遭到损坏或毁坏。防止故障电流的传统方法是迅速断开断路器并完全停止电流和功率流动。

[0008] 与断路器相关的检测电路监测网络以检测故障（或过电流）情况的存在。在几毫秒的检测内，来自检测电路的激活信号可以触发断路器断开以防止对各种网络部件的破坏。目前，现有的断路器装置的最大能力是 80,000 安培，且这些仅仅是用于输电水平电压。在上世纪建造的公用事业网络的许多部分被建造为具有只能耐受 40,000 至 63,000 安培故障电流的网络装置。遗憾的是，随着公用事业网络的发电和输电水平的提高，故障电流水平提高至在输配电水平电压下均将超过目前安装的或现有技术断路器装置的能力（即大于 80,000amps) 的程度。即使在较低的故障电流水平下，使整个电网中的断路器从一个水平升级至较高水平的成本也可非常高。因此，公用事业公司正在寻找新的解决方案以应对提高的故障电流水平。在大多数情况中，需要将故障电流降低至少 10％才能实现电网运行的明显改善。正在开发的一种此类解决方案是称为 HTS 故障电流限制器 (fault current limiter ;FCL) 的装置。

[0009] HTS FCL 是互连到公用事业网络的专用装置，用于将故障电流的幅值降低至传统、容易得到或已经安装的断路器可以处理的水平。参见 Supercond Sci.Technol.20(2007) R15-R29 中由 Noe 和 M.Steurer 所著的“High-TemperatureSuperconductor Fault Current Limiters”。此类 HTS FCL 通常由短的刚性模块构成，这些短的刚性模块由 HTS 材料的实心棒或圆柱制成，当在其超导临界电流以上将这些短的刚性模块驱动至电阻性状态时，其具有非常高的电阻。遗憾的是，此类独立 HTS FCL 目前相当大且相当昂贵。在最需要 HTS 电缆的人口密集的都市环境中的变电站中，空间特别受到重视。公用事业公司还可以使用大型电感器，但是它们可能会造成额外的损耗、电压调节和电网稳定性问题。而且，遗憾的是，出色的电流限制器（例如熔丝）在每次故障事件之后均需要更换。此外，虽然正在开发新的电力电子 FCL，但存在关于其是否能够保证故障安全及其是否能够可靠地扩展至输电电压水平的问题。

[0010] 为了使 HTS 电缆能够经受故障电流的流动，结合 HTS 导线而引入了大量的铜，但这会增加电缆的重量和尺寸。参见将在 IEEE Transaction on AppliedSuperconductivity 中发表的由 J.F.Maguire，F.Schmidt，S.Bratt，T.E.Welsh，J.Yuan，A.Allais 和 F.Hamber

所著的“Development and Demonstration of a Long Length HTSCable to Operate in the Long Island Power Authority Transmission Grid”。铜常常填充HTS电缆的芯中以螺旋形式缠绕有HTS导线的中央成形体，此会防止芯被用作液氮流动通道。或者，尤其是对于多相电缆，在电缆的螺旋形缠绕的层内将铜导线与HTS导线混合。这些铜导线或结构可在电气上与HTS导线并联，并可称为HTS电缆内的“铜并联支路(copper shunts)”。在存在超过电缆的HTS导线的临界电流的大故障电流的情况下，它们停止导电或切换至电阻性状态，并由于电阻I^2R损耗（其中I是电流且R是电缆的电阻）而变热。这些铜并联支路可被设计为吸收和载送故障电流以防止HTS导线过热。铜的量非常大，以致于其在电缆中的总电阻相当小，并因此而在减小故障电流方面具有微乎其微的效果。铜可被定义为意指纯铜或具有少量杂质的铜，使得其电阻率在77～90K温度范围内相当低（例如＜0.5微欧-厘米，或低到0.2微欧-厘米）。

[0011] 在欧洲SUPERPOLI项目中，研究也可以限制电流的超导电力链路（参见IEEE Trans.on Applied Superconductivity，Vol.13，No.2，2003年6月，pp.1972-5中A.Usoskin等人所著的“SUPERPOLI Fault-Current Limiters Based onYBCO-Coated Stainless Steel Tapes”;IEEE Trans.on Applied Superconductivity，Vol.11，No.1，2001年3月，pp.1928-31中Paasi等人所著的“Design Performanceof a Superconducting Power Link”;IEEE Trans.on Applied Superconductivity，Vol.11，No.1，2001年3月，pp.2503-6中Verhaege等人所著的HTS Materials of ACCurrent Transport and Fault Current Limitation;以及题为“Superconductive ElectricalTransmission Line”的美国专利第5,859,386号）。

[0012] 根据用于早期的独立FCL的典型方法，此项目研究可形成用于电力链路的模块或母线的的刚性实心HTS材料棒或圆柱。模块或母线的典型长度是50厘米至2米。在第二种方法中，使用经过涂敷的导线，其中在高电阻不锈钢衬底上涂敷YBCO材料。使用金稳定剂层，但其被保持得非常薄以使每单位长度的电阻尽可能高。导线被以螺旋形式缠绕在刚性圆柱形芯上，该刚性圆柱形芯形成用于电力链路的模块或母线的另一选项。响应于故障电流，这两个模块均切换到非常高的电阻性状态以限制电流。SUPERPOLI项目中提出的形成较长距离电缆的构思是用挠性编织铜互连线来互连各挠性模块。参见题为“Superconductive ElectricalTransmission Line”的美国专利第5,859,386号。未考虑使用具有较低电阻和较高热容量并因而具有较低局部受热水平的导线来设计和制造具有故障电流限制功能的长距离连续挠性电缆的可能性。也没有考虑附加电网元件可以优化链路功能的的可能性。

[0013] 需要改善HTS电缆应对故障电流的方式并提供改善的替代物来替代独立FCL或其它故障电流限制装置（例如形成电力链路的具有高的每单位长度电阻的故障电流限制模块）的使用。具有故障电流限制功能的实际长距离连续挠性HTS电力电缆将在实现高容量、低占用面积和环境上清洁的输配电方面提供主要益处，同时避免在拥挤的公用事业变电站中需要单独且昂贵的故障电流限制装置。

发明内容

[0014] 在本发明的第一实施方式中，一种低温冷却HTS电缆被配置成包含在公用事业电网内，该公用事业电网具有在没有低温冷却HTS电缆的情况下会发生的最大故障电流。该

低温冷却 HTS 电缆包括用于使液体致冷剂循环的连续液体低温冷却剂路径。HTS 导线的连续挠性布置具有使最大故障电流衰减至少 10％的阻抗特性。HTS 导线的连续挠性布置被配置成允许低温冷却 HTS 电缆在发生最大故障条件期间以 HTS 导线内的最大温升工作，该最大温升低到足以防止在液体致冷剂内形成气泡。

[0015] 可包括一个或多个以下特征。该低温冷却 HTS 电缆可包括连续挠性缠绕支撑结构。所述 HTS 导线中的一根或多根可以相对于该连续挠性缠绕支撑结构同轴地定位。该连续挠性缠绕支撑结构可包括空心轴芯。该连续挠性缠绕支撑结构可包括波纹不锈钢管。

[0016] 屏蔽层可相对于连续挠性缠绕支撑结构同轴地定位。绝缘层可相对于连续挠性缠绕支撑结构同轴地定位并定位于该一个或多个导电层与屏蔽层之间。液体致冷剂可以是液氮。液氮可被加压至大气压力以上并可被过冷至 77K 以下。液体致冷剂可以是液氢。

[0017] 该低温冷却 HTS 电缆可包括一根或多根 HTS 导线。HTS 导线中的至少一个可以由选自以下各项组成的群组的 HTS 材料构成：钇或稀土钡铜氧化物；铊钡钙铜氧化物；铋锶钙铜氧化物；汞钡钙铜氧化物；以及二硼化镁。所述一根或多根 HTS 导线中的至少一个可包括至少一个稳定剂层，该稳定剂层具有处于 100 ～ 600 微米范围内的总稳定剂厚度和在 90° K 下处于 0.8 ～ 15.0 微欧 - 厘米范围内的电阻率。所述一根或多根 HTS 导线中的至少一个可包括至少一个稳定剂层，该稳定剂层具有处于 200 ～ 500 微米范围内的总稳定剂厚度和在 90° K 下处于 1 ～ 10.0 微欧 - 厘米范围内的电阻率。可通过配置所述 HTS 导线中一根或多根的一个或多个设计参数来定义故障条件期间的阻抗特性和最大温升。所述一个或多个设计参数可包括以下各项中的一个或多个：稳定剂电阻率因数；稳定剂厚度因数；导线比热因数；以及工作临界电流密度因数。

[0018] 可与该低温冷却 HTS 电缆串联地耦合一个或多个高速开关。所述一个或多个高速开关可被配置为在故障条件开始之后断开。该低温冷却 HTS 电缆可被配置为在链接多个变电站的母联应用中使用。

[0019] 在本发明的另一实施方式中，一种配置低温冷却 HTS 电缆的方法包括确定该低温冷却 HTS 电缆的最大容许工作温度。该低温冷却 HTS 电缆包括挠性缠绕支撑结构，该挠性缠绕支撑结构被配置为支撑相对于挠性缠绕支撑结构同轴地定位的一个或多个超导材料导电层。配置该低温冷却 HTS 电缆的一个或多个设计参数，以便在发生最大故障条件期间，该低温冷却 HTS 超导电缆的实际工作温度被保持在低于最大容许工作温度的水平，且最大故障电流减小至少 10％。

[0020] 可包括一个或多个以下特征。所述最大容许工作温度可本质上对应于在低温冷却 HTS 电缆的至少一部分内循环的制冷剂从液态变为气态时的温度。该制冷剂可以是加压液氮。所述一个或多个设计参数可包括以下各项中的一个或多个：导线电阻率因数；稳定剂厚度因数；比热因数；故障电流持续时间因数；以及每单位宽度的导线工作临界电流因数。可确定低温冷却 HTS 电缆的实际工作温度。可将低温冷却 HTS 电缆的实际工作温度与低温冷却 HTS 电缆的最大容许工作温度相比较。

[0021] 配置一个或多个设计参数可包括调整低温冷却 HTS 电缆的阻抗。调整低温冷却 HTS 超导电缆的阻抗可包括以下各项中的一个或多个：将低温冷却 HTS 电缆的长度调整至最小值以上；调整低温冷却 HTS 电缆的电阻率；调整被粘结至低温冷却 HTS 电缆内的 HTS 导线的稳定剂层的厚度；通过低温冷却 HTS 电缆中的密封剂来调整 HTS 导线的比热；以及调

整包括在低温冷却 THS 电缆内的 HTS 导线的工作临界电流密度。

[0022] 所述稳定剂层可至少部分地由黄铜材料构成。该低温冷却 HTS 电缆可包括一根或多根 HTS 导线。HTS 导线中的至少一个可由选自以下各项组成的群组的材料构成：钇或稀土钡铜氧化物；铊钡钙铜氧化物；铋锶钙铜氧化物；汞钡钙铜氧化物；以及二硼化镁。该低温冷却 HTS 超导电缆可被耦合至具有电压源阻抗的电压源。可确定该电压源的电压源阻抗。

[0023] 下面在附图和说明中阐述一种或多种实施方式的细节。其它特征和优点将通过本说明、附图、以及权利要求而变得显而易见。附图说明图 1 是安装在公用事业电网内的铜芯 HTS 电缆系统的示意图；图 2 是图 1 的铜芯 HTS 电缆的等距视图；图 3 是空芯 HTS 电缆的等距视图；图 4 是安装在公用事业电网内的图 3 的空芯 HTS 电缆的示意图；图 5A 是 HTS 导线的横截面图；图 5B 是替代实施例 HTS 导线的横截面图；图 6 是公用事业电网的示意图；图 7 是安装在公用事业电网内的图 3 的空芯 HTS 电缆的模型；以及图 8 是一种配置图 3 的空芯 HTS 电缆的方法的流程图。各图中的相同附图标记指示相同的元件。

具体实施方式

概述

[0024] 参照图 1，公用事业电网 10 的一部分可包括高温超导 (HTS) 电缆 12。HTS 电缆 12 可具有几百或几千米的长度，且可提供用于从发电站（未示出）输送电力或从远程公用事业公司（未示出）输入电力的相对高电流 / 低电阻电气路径。

[0025] HTS 电缆 12 的横截面积可以仅是传统铜芯电缆的横截面积的几分之一，且可能够载送相同大小的电流。如上所述，在相同横截面积内，HTS 电缆可以提供传统 AC 电缆的三至五倍的载流容量；以及达到传统 DC 电缆的十倍的载流容量。随着 HTS 技术的成熟，这些比可以增大。

[0026] 如下文所将更详细地讨论，HTS 电缆 12 包括 HTS 导线，该 HTS 导线可能够处理多达相同尺寸铜导线的一百五十倍的电流。因此，通过使用相对少量的 HTS 导线（与绞合在传统 AC 电缆的芯内的大量铜导线相反），可构造所提供电力能够三至五倍于相同尺寸传统铜导体电力电缆的 HTS 电力电缆的。

[0027] 可在输电电网段 14 内连接用于载送例如 138kV 水平的电压并从电网段 14 延伸至电网段 16 的 HTS 电缆 12，所述电网段 16 可接收此电压并将其变换至例如 69kV 的较低水平。例如，输电电网段 14 可接收 765kV 的电力（经由架空线路或电缆 18）且可包括 138kV 的变电站 20。138kV 变电站 20 可包括 765kV/138kV 变压器（未示出），用于将在电缆 18 上接收到的 765kV 电力降低至 138kV。然后可经由例如 HTS 电缆 12 将此“降低的”138kV 电力提供给输电电网段 16。输电电网段 16 可包括 69kV 变电站 24，该 69kV 变电站 24 可包括用于将经由 HTS 电缆 12 接收到的 138kV 电力降低至 69kV 电力的 138kV/69kV 变压器（未示出），所述 69kV 电力可被分配给例如装置 26、28、30、32。装置 26、28、30、32 的实例可包括但不限于 34.5kV 变电站。

[0028] 以上所述电压水平仅用于说明性目的，并非旨在限制本发明。因此，本发明同样可适用于输配电系统中的各种电压和电流水平。同样地，本发明同样可适用于诸如工业配电或车辆配电等非公用事业应用（例如船、火车、飞机以及宇宙飞船）。

[0029] 一个或多个断路器 34、36 可被连接在例如 HTS 电缆 12 的每一端上，并可允许 HTS 电缆快速地与公用事业电网 10 断开连接。故障管理系统 38 可为 HTS 电缆 12 提供过电流保护，以保证 HTS 电缆 12 被维持在可使 HTS 电缆 12 受损点之下的温度。

[0030] 故障管理系统 38 可通过监测在 HTS 电缆 12 所耦合到的公用事业电网段中流动的电流来提供此类过电流保护。例如，故障管理系统 38 可感测通过 138kV 变电站 20 的电流（使用例如电流传感器 40），并可至少部分地基于由电流传感器 40 提供的信号来控制断路器 34、36 的操作。

[0031] 在本实例中，HTS 电缆 12 可被设计为耐受持续时间为 200ms（即 60Hz 电压的 12 个周波）的高达 51kA 的故障电流。故障管理系统 38 的细节在 2006 年 7 月 21 日提交且题为“Fault Management of HTS Power Cable”的共同待决美国专利申请案第 11/459,167 号中有所描述。通常，为了耐受此水平的故障电流，HTS 电缆可包含大量的铜，此可帮助载送高故障电流并从而保护 HTS 导线。铜的存在是为了保护 HTS 电缆，但是其由于其电阻非常低而不具有显著的电流限制效果。

[0032] 还参照图 2，图中示出可包括绞合铜芯 100 的单相铜芯 HTS 电缆 12 的典型实施例，所述绞合铜芯 100 沿径向依次被第一 HTS 层 102、第二 HTS 层 104、高电压介电绝缘层 106、铜屏蔽层 108、HTS 屏蔽层 110、冷却剂通道 112、内低温恒温器壁 114、隔热层 116、真空空间 118、外低温恒温器壁 120 和外电缆护套 122 所围绕。HTS 层 102 和 HTS 层 104 还可称为“相导体”。或者，铜屏蔽层 108 可位于 HTS 屏蔽层 110 外面。在工作期间，可从外部冷却剂源（未示出）供应制冷剂或液体致冷剂（例如液氮，未示出），且所述制冷剂或液体致冷剂可在冷却剂通道 112 内部并沿着冷却剂通道 112 的长度循环。电缆的所有部件被设计为使得能够实现 HTS 电缆 12 的挠性。例如，绞合铜芯 100（在其上面缠绕有第一 HTS 层 102 和第二 HTS 层 104）是挠性的。因此，通过利用挠性绞合铜芯 100，实现沿着其长度呈连续挠性的 HTS 电缆 12。可选地，可使用波纹金属成形体来支撑以螺旋形式缠绕的 HTS 导线，从而沿着电缆长度提供连续的挠性。

[0033] 另外 / 或者，可利用附加的同轴 HTS 和绝缘层。例如，对于单相，可使用多于两层 HTS 导线。而且，可利用被绝缘层（未示出）分隔的三组 HTS 层来载送三相功率。此类电缆布置的实例是由 Ultera（即位于 Carrollton，GA. 的 Southwire 公司与位于德国 Cologne 的 nkt cables 公司的合资企业）提出的 Triax HTS 电缆布置。HTS 电缆 12 的其它实施例可包括但不限于：热和 / 或冷电介质配置；单相对多相配置；以及各种屏蔽配置（例如无屏蔽或基于低温恒温器的屏蔽）。

[0034] 铜芯 100 和铜屏蔽层 108 可被配置为载送电缆 12 内可能出现的故障电流（例如故障电流 124）。例如，当在电缆 12 内出现故障电流 124 时，HTS 层 102、104 内的电流可急剧增大至超过 HTS 层 102、104 的临界电流水平（即 I_c）的水平，该水平可促使 HTS 层 102、104 失去其超导特性（即 HTS 层 102、104 可变为“正常”）。对于额定值为 $3000A_{rms}$ 的电缆（其中 A_{rms} 指的是电流的有效值），临界电流水平 I_c 的典型值是 $4,242A_{peak}$。

[0035] HTS 材料中的临界电流水平可取决于电场水平的选择。传统上，临界电流水平 I_c 被定义为 1 微伏 / 厘米的电场水平，虽然也使用较低值。然而，典型超导体表现出为电流水平的函数形式的位于零电阻（即超导）状态和全电阻（即非超导）状态之间的过渡区。由于此过渡区中的工作而引起的导体损耗低于在全电阻状态下的导体损耗。因此，在实际

中，HTS 电缆的导体部分可在临界电流水平下切换到全电阻状态，所述临界电流水平是由 1 微伏 / 厘米标准定义的传统临界电流水平 Ic 的因数（“f”）倍。在具有 YBCO 薄膜的折线 (meander line) 导线中，此因数被确定为约为 2，但是观察到其随着时间推移而略有变化。参见 IEEE Trans. 在 Applied Superconductivity, vol.13, No.2, June 2003, pp.2044-7 中由 H.-P.Kraemer 等人所著的 Switching Behavior of YBCO Thin Film Conductors in Resistive FaultCurrent Limiters。具有类似 YBCO 薄膜的 HTS 导线的 f 因数被预期处于类似的范围内（例如 1 ～ 4）。

[0036] 因此，当超过（上文定义的）临界电流水平与 f 因数的乘积时，HTS 层 102、104 的电阻可显著增大，并可变得相当高（即在与铜芯 100 相比时）。由于通过多个平行导体的电流相对于各单独导体的电阻而成反比地分布，大部分故障电流 124 被转向与 HTS 层 102、104 并联连接的铜芯 100。故障电流 124 通过铜芯 100 的此传输可持续至：故障电流 124 减弱；或适当的断路器（例如断路器 34、36）断开故障电流 124 通过 HTS 电缆 12 的传输。

[0037] 可通过由铜芯 100 提供的两点益处来避免 HTS 电缆 12 中的 HTS 导体的过热。首先，通过使故障电流 124（或其至少一部分）从 HTS 层 102、104 改向到铜芯 100，可避免 HTS 电缆 12 中的 HTS 导体的过热。其次，铜芯 100 的增加的热容量会降低 HTS 层 102 和 104 中的温升。倘若故障电流 124（或其至少一部分）未从 HTS 层 102、104 改向到铜芯 100，则故障电流 124 可由于 HTS 层 102、104 的高电阻而使 HTS 电缆 12 中的 HTS 导体显著变热，这可导致形成液氮的气“泡”（即由于液氮在冷却剂通道 112 内从液态转换为气态）。遗憾的是，液氮的气“泡”的形成可降低介电层的介电强度并可导致 HTS 电缆 12 的电压击穿和毁坏。对于热介电电缆配置（未示出），未被从 HTS 层 102、104 改向的故障电流可单纯地使 HTS 层 102、104 过热并毁坏。

[0038] HTS 电缆 12 的实例可包括但不限于可从法国巴黎的 Nexans；日本大阪的 Sumitomo Electric Industries 公司；以及 Ultera（即位于 Carrollton, GA. 的 Southwire 公司与位于德国 Cologne 的 NKT cables 公司的合资企业）获得的 HTS 电缆。

[0039] 虽然铜芯 100 使 HTS 层 102、104 周围的故障电流（或其一部分）改向，但利用此类“内部”铜芯存在缺点。例如，铜芯 100 可能需要 HTS 电缆 12 在物理上较大且较重，这可导致成本增加且 HTS 电缆 12 内的热滞留量 (heat retention) 更大。因此，可能需要更多的制冷以补偿附加的热滞留量，从而导致总体系统成本和运行成本升高。此外，万一故障电流的能量使温度升高至超过可在 HTS 层 102、104 中保持超导性的点，则铜芯 100 的增加的热容量和 HTS 层 102、104 与冷却剂之间由于介电层而引起的热阻可大大地增加恢复时间。例如，倘若故障电流通过铜芯 100 改向，则制冷系统（未示出）将 HTS 电缆 12 冷却至适当的工作温度范围内（例如 66 ～ 77° K）会耗费几个小时的时间。将 HTS 电缆 12 冷却至电缆的工作范围内所需的时间一般称为“恢复时间”，公用事业公司可能要求该时间尽可能短（例如几秒钟）。或者，可对 HTS 电缆 12 使用独立的故障电流限制器来限制故障电流；然而，这具有需要在链接到 HTS 电缆 12 的变电站中安装另一台大型且昂贵的电气设备的缺点。

[0040] 参照图 3，示出根据本发明的挠性空芯 HTS 电缆 150。虽然 HTS 电缆 150 可包括现有技术铜芯 HTS 电缆 12 的各种部件，但 HTS 电缆 150 不包括绞合铜芯 100（图 2）- 其已被替换为挠性空芯（例如内冷却剂通道 152）。内冷却剂通道 152 的实例可包括但不限于挠性波纹不锈钢管。所有铜屏蔽层也被去除。冷却剂（例如液氮）可流过内冷却剂通道 152。

[0041] 以类似于铜芯 HTS 电缆 12 的方式，内冷却剂通道 152 可沿径向依次被第一 HTS 层 102、第二 HTS 层 104（通常以与层 102 相反的螺旋方向缠绕）、高电压介电绝缘层 106、HTS 屏蔽层 110、冷却剂通道 112、内低温恒温器壁 114、隔热层 116、真空空间 118、外低温恒温器壁 120 和外电缆护套 122 所围绕。在工作期间，可从外部冷却剂源（未示出）供应制冷剂（例如液氮，未示出），且所述制冷剂可在冷却剂通道 112 和内冷却剂通道 152 内并沿着冷却剂通道 112 和内冷却剂通道 152 的长度循环。在例如 MgB_2 等较低转变温度材料的情况下，可使用替代冷却剂（例如液氖或液氢）。

[0042] 如 HTS 电缆 12 一样，HTS 电缆 150 的所有部件被设计为使得能够实现沿电缆长度的连续挠性。例如，且如上所述，内冷却剂通道 152（在其上面缠绕有第一 HTS 层 102 和第二 HTS 层 104）是挠性的。因此，通过利用挠性内冷却剂通道 152，可实现挠性 HTS 电缆 150。

[0043] 还参照图 4，公用事业电网部分 10’可包括挠性长距离 HTS 电缆 150。这里，长距离被定义为大于 200m。其还可包括与 HTS 电缆 150 并联地连接的传统电缆（即非超导电缆，未显示）。传统电缆的实例可包括但不限于可从位于 CT. Seymour 的 Kerite 公司获得的 500kcmil，138kV Shielded Triple Permashield(TPS) 电力电缆。传统电缆可以是改造应用中的现有电缆，在所述改造应用中，添加 HTS 电缆 150 以替代一根或多根传统电缆，以便例如增大电网的电力容量。或者，所述传统电缆可以是与 HTS 电缆 150 同时安装并与适当的母线网络和断路器互连的新传统电缆。

[0044] HTS 电缆 150 和 / 或附加 HTS 电缆（未示出）可被包括在超导电气路径 200 中，该超导电气路径 200 可包括公用事业电网的一部分。此外，超导电气路径 200 可包括其它超导配电装置，诸如母线（未示出）、变压器（未示出）、故障电流限制器（未示出）、以及变电站（未示出）。

[0045] 可与 HTS 电缆 150 串联地耦合快速开关组件 202。快速开关组件 202 的实例是由位于 Greenburg，PA 的 ABB 公司制造的 138kV 型 PM 电力断路器。快速开关组件 202（例如能够在 4 个周波中断开的开关）可由故障管理系统 38 来控制。例如，在感测到故障电流 124 时（图 3），故障管理系统 38 可断开快速开关组件 202，使得 HTS 电缆 150 实质上与故障电流 124 隔离。对于多相电源，可利用多个快速开关组件 202。或者，将某些快速开关组件或断路器构造为单个三相装置。快速开关组件 202 可在足以使 HTS 电缆 150 恢复至其超导状态的时间之后重新闭合。如果现有公用事业断路器 34、36 切换得快到足以满足下述受热要求，则可不需要快速开关组件 202。

[0046] 传统电缆（未示出）和 / 或附加传统电缆（未示出）可被包括在非超导电气路径内，该非超导电气路径可包括公用事业电网的一部分。此外，该非超导电气路径可包括其它配电装置，诸如母线（未示出）、变压器（未示出）、故障电流限制器（未示出）、以及变电站（未示出）。该非超导电气路径可被维持在非低温冷却温度（例如至少为对应于 0℃的 273K 的温度）。例如，该非超导电气路径可不经冷却，并因而可以采取环境温度。

[0047] 如下文所将更详细地描述，通过从挠性长距离 HTS 电缆 150 的内部去除铜芯 100（图 2）和铜屏蔽层 108（图 2）、及通过控制 HTS 电缆 150 的阻抗，HTS 电缆 150 可在实体上更小，这可促使制造成本降低且来自 HTS 电缆 150 的热损耗更低。因此，HTS 电缆 150 可需要较少的制冷（与铜芯 HTS 电缆 12 相比）并可使总体系统成本和运行成本降低。此外，通过从 HTS 电缆 150 内部去除铜芯 100，HTS 电缆 150 的热容量和 HTS 层 102、104 与冷

却剂之间的热电阻均可得以降低，从而允许在故障电流 124 使 HTS 电缆 150 的温度升高至超过可在 HTS 层 102、104 中保持超导性的点的情况下有更快的恢复时间。通过从挠性长距离 HTS 电缆 150 的内部去除铜芯 100、及通过控制 HTS 电缆 150 的阻抗，可以将故障电流限制功能直接结合到 HTS 电缆 150 中，从而在希望保护 HTS 电缆或下游公用事业设备免受故障电流影响的情况下无需使用单独的独立故障电流限制器。

HTS 电缆和故障电流限制器

[0048] 再次参照图 1，如果电网段 10 内的故障电流促使流过 HTS 电缆 12 的电流增大而超过传统断路器 34、36 的极限，则可在电网段 10 内包含 HTS FCL 装置 42（以虚线示出）或传统电抗器技术（未示出），以将流过 HTS 电缆 12 的故障电流的幅值限制至可被传统断路器 34、36 断开的水平。在正常条件下，当标称电流水平在电网段 10 内流动时，与功率流串联地连接的 HTS FCL 装置 42 可被设计为在电网中引入非常低的阻抗（与其它电网阻抗相比）。然而，当在电网段 10 中出现故障电流时，该电流促使 HTS FCL 42 中的超导体立刻变为“正常”或非超导（即电阻性）状态，并且这会在电网段 10 中引入非常大的阻抗。HTS FCL 42 可被设计为将故障电流限制至处于传统断路器 34、36 的断开能力之内的预定水平。

[0049] 包括与（德国的）Siemens AG 联合的 (Westboro，MA 的）AmericanSuperconductor Corporation 在内的各种公司正在开发独立 HTS FCL 装置 42。遗憾的是，将 HTS FCL 装置 42 引入电网段 10 可能非常昂贵且可能需要大量的空间以容纳装置 42，这可能难以适合于尤其是都市区。包括（法国的）Nexans 和（德国的）EHTS 在内的各种公司正在开发具有故障电流限制能力的短母线或模块。虽然故障电流限制母线可具有某些应用，但其不提供所追求的高容量、低占用面积和长距离连续挠性电缆为输配电应用提供的挠性。

[0050] 根据本发明，例如连续挠性长距离 HTS 电缆 150（图 3）等 HTS 装置经适当设计后可被用作故障电流限制器本身，而无须包含诸如 HTS FCL 装置 42（图 1）等单独的 HTS FCL。通过控制例如 HTS 电缆 150 的正常状态（电阻性）阻抗，HTS 电缆本身可被用于获得典型的独立 HTS FCL 装置（例如 HTS FCL 42）的理想效果（例如故障电流的衰减），同时避免典型的独立 HTS FCL 装置的不理想效果（例如成本和尺寸）。具体而言，及如下文更详细地所述，如果 HTS 电缆 150 的长度足够长，且如果 HTS 电缆 150 被制造为表现出期望的阻抗特性，则连续挠性长距离 HTS 电缆 150 可独自提供故障电流 124（图 3）的显著衰减，而不会受热至在液体致冷剂中产生气泡的程度且没有电介质击穿的风险。

故障电流限制 (FCL)HTS 电缆的概述和用于 FCL 电缆的 HTS 导线的设计

[0051] 如下文将更详细地所述，通过控制挠性长距离 HTS 电缆 150 的各种参数（例如电缆 150 内的 HTS 导线的电阻率和稳定剂厚度），可实现能同时具有以下功能的 HTS 电缆 :1) 提供所需的净电阻以实现电缆中的故障电流的显著减小，以及 2) 将整个 HTS 电缆 150 内由故障电流引起的温升维持在低于最大值的水平，该最大值可防止在电缆内循环的液氮冷却剂产生气泡。如上所述，液氮的气“泡”的形成可降低 HTS 电缆 150 的介电层的介电强度，并可导致 HTS 电缆 150 的电压击穿和毁坏。

[0052] 电阻率，也可称为比电阻，是材料阻碍电流流动的强度的量度。具体而言，低电阻率可指示材料轻易地允许电荷运动。电阻率的方便量度是微欧 - 厘米。

[0053] 如下文将更详细地所述，HTS 电缆 150 的结构和 HTS 电缆 150 内的 HTS 导线的设计从根本上不同于已对独立 HTS FCL 或故障电流限制母线提出的设计。

[0054] 还参照图 5，图中示出用来构成故障电流限制 HTS 电缆 150 的 HTS 层 102、104 的一根 HTS 导线 250 的横截面图。此导线架构也可称为“经涂敷的导线”架构，因为一薄层超导体（例如 HTS 层）被涂敷到经缓冲的沉底上。通常，HTS 层包括如前面所定义的超导体 YBCO，尤其是可用稀土元素代替 Y 的组合物 $YBa_2Cu_3O_7$。应理解，总体组成可不同于此组成，因为在该层中可能存在杂质相。还可在经涂敷的导体架构中使用其它 HTS 材料。

[0055] 在本实例中，HTS 层 102、104 中所使用的 HTS 导线 250 被示为包括两个稳定剂层 252、253 和衬底层 254。衬底层 254 的实例可包括但不限于镍 - 钨、不锈钢和哈氏合金 (Hastelloy)。位于稳定剂层 252 与衬底层 254 之间的可以是缓冲层 256、HTS 层 258（例如钇钡铜氧化物 YBCO 层）、以及覆盖层 260。缓冲层 256 的实例是钇、由钇稳定的氧化锆 (yttria-stabilized zirconia)、以及二氧化铈 (CeO_2) 的组合，且覆盖层 260 的实例是银。焊料层 262（例如 SnPbAg 层）可用来将稳定剂层 252 和 253 结合至覆盖层 260 和衬底层 254。

[0056] 除上述导线配置之外，其它导线配置被视为包括在本发明的范围内。例如，可使用单个稳定剂层。或者，可在第二稳定剂层 253 与衬底层 254 的底侧之间设置第二 HTS 层（具有其缓冲层和覆盖层，未示出）。可选地，HTS 导线可由位于 HTS 导线外面的两个稳定剂层组成，两个衬底（每个具有缓冲层、HTS 层、以及覆盖层）被位于这两个衬底层之间的第三稳定剂层隔开。可使用焊料层来促进任何所需的结合（可能衬底层 254、缓冲层 256、HTS 层 258 与覆盖层 260 之间的除外）。

[0057] 还参照图 5B，图中示出作为 HTS 导线 250 的替代实施例的 HTS 导线 250’。HTS 导线 250’可包括位于第二稳定剂层 253 与第三稳定剂层 282 之间的第二衬底层 280。可在稳定剂层 253（和 / 或稳定剂层 282）与衬底层 280 之间设置缓冲层、HTS 层（例如钇钡铜氧化物 -YBCO 层）、覆盖层、以及焊料层。

HTS 导线的稳定剂层

[0058] 如果 HTS 导线的热容量高且 HTS 导线的电阻率处于最佳水平，则 HTS 导线最有效且最经济地充当故障电流限制器。稳定剂层 252 可能是实现这些特性所必需的。可能特别适合于稳定剂层 252 的合金的实例包括低合金黄铜（例如 Cu-Zn），例如，Zn 在 3 ～ 40％范围内，以及基于例如 Cu-Sn 合金系的可能的其它黄铜合金。在 77 ～ 110K 的温度范围内电阻率处于 0.8 ～ 15 微欧 - 厘米范围内的合金可能是最佳的。具体黄铜合金可包括但不限于黄铜 210(95Cu-5Zn)、220(90Cu-10Zn)、以及 230(85Cu-15Zn)、240(80Cu-20Zn) 和 260(70Cu-30Zn)。其它铜基合金可包括例如蒙乃尔 (Monel) 系列 (Cu-Ni)，其也可提供上述范围内的电阻率。可使用 Cu-Ni 合金或在 70 ～ 110K 范围内具有磁转变的其它合金，并且其在此温度范围内可具有大比热峰值的附加优点。然而，对于这些合金应谨慎地通过使矫顽力 (coercivity) 最小化而使磁性 AC 损耗最小化。

[0059] 为了在电缆连接中提供适当挠性，稳定剂层 252、253 可处于软退火状态，例如 1/2 或 1/4 硬度。给定 HTS 导线的稳定剂层 252、253 的典型总厚度可在 100 ～ 600 微米范围内，更佳地在 200 ～ 500 微米范围内。如果导线变得过厚及过硬，则其可变得难以绞合成连续

挠性电缆的螺旋缠绕。稳定剂层 252、253 的热导率在 77 ～ 110K 范围内可大于 0.1W/cmK，以在故障的初期阶段期间减轻 HTS 层（例如 HTS 层 102、104）的过热并提供足够迅速的恢复。可通过例如焊剂层压或粘合来施用稳定剂层 252、253。此外，还可通过诸如浸涂、镀覆、汽相沉积、电沉积、金属有机液相沉积或喷涂等涂敷方法，作为金属或复合材料来施用稳定剂层 252、253。

用于 HTS 导线的密封剂

[0060] 可通过可选地添加沉积或包覆在经稳定化的 HTS 导线层周围的导电性不良的“绝缘体”层来提供附加比热。导电性不良的绝缘体层可称为密封剂 264。密封剂 264 可形成液体不可透过层，该液体不可透过层具有一般受限的传热系数以延迟热量向周围液体冷却剂（例如液氮）中的传送，从而允许 HTS 导线的温度热化（thermalize），即在其整个横截面上变得更均匀并从而使液体冷却剂中热点的出现和气泡的形成最小化。还可优化 HTS 导线的表面（例如通过表面特征和表面化学过程）以抑制液体冷却剂起泡或沸腾的开始。

[0061] 密封剂 264 可以是包括普通电绝缘材料的聚合物（例如聚乙烯、聚酯、聚丙烯、环氧树脂、聚甲基丙烯酸甲酯、聚酰亚胺、聚四氟乙烯、以及聚氨酯）。密封剂 264 的厚度可经选择以平衡通过向周围液体冷却剂中传热来冷却 HTS 导线之所需和使 HTS 导线的温度最大化而不在周围液体冷却剂内形成气泡之所需。密封剂 264 的一般厚度范围是 25 ～ 300 微米，并且密封剂 264 的理想厚度范围是 50 ～ 150 微米。

[0062] 在较佳形式中，密封剂 264 也可微弱导电（这可能通过添加诸如金属、石墨或碳粉等导电颗粒来实现），或者可选自某些具有部分导电性的聚合物。密封剂 264 的净电阻率可在 0.0001 ～ 100 欧姆厘米范围内。虽然此适中的导电性在其电阻性状态或正常状态下可能不会显著降低 HTS 导线的故障电流限制电阻，但此导电性可保证 HTS 电缆中的 HTS 导线在每个横截面处均保持等电位，并允许电流在 HTS 电缆 150 中的不同 HTS 导线之间共享。在电流浪涌的情况下，保持等电位非常重要，否则此可能会在 HTS 导线之间引起感应电位差，从而对 HTS 导线造成电介质击穿和可能的损坏。可选地，密封剂 264 可以是高电阻率金属或具有此范围内的电阻的半导电材料，抑或瓷釉、玻璃、或晶体氧化物材料，此还可以包含导电性增强材料。

[0063] 密封剂 264 的外表面可涂敷能降低密封剂 264 与周围液体冷却剂（例如液氮）之间的传热系数的材料。或者，密封剂 264 的表面可被纹理化，以提高密封剂 264 与周围液体冷却剂（例如液氮）之间的传热系数。此外，密封剂 264 的表面可涂敷例如更高导电率金属颗粒或突出的金属纤维，以便通过使热量快速地向外散发到周围的液体冷却剂中来抑制成核。然而，任何此类表面处理还必须避免降低液态下的介电强度。

[0064] 可使用各种包覆 / 涂敷方法来施用密封剂 264，包括例如与单遍方法相比在统计学上能降低穿孔发生率的多遍方法。或者，可通过诸如浸涂、挤压、镀覆、汽相沉积或喷涂等涂敷方法来施用密封剂 264。

[0065] 可在 HTS 导线进行轴向拉伸而在导线中达到例如 0.3％的拉伸应变（例如约 100 兆帕斯卡数量级）的同时施用密封剂 264，从而在施用工艺完成时将密封剂 264 置于压缩状态，并降低密封剂 264 中的穿孔的可能性。因此，一旦完成，密封剂 264 即可被轴向压缩，同时密封剂 264 内的 HTS 导线被轴向拉伸（与其初始状态相比）。

[0066] 如果使用包覆程序来施用密封剂 264，则可施用附加浸渍涂层（例如聚合物、油漆或清漆，未示出），该附加浸渍涂层通过密封剂 264 中的任何缝隙 / 开口而渗透到具有不可透过材料的被包覆层中，从而形成气密性密封剂。或者，可通过以滚压或压缩工艺（例如等静压压制 (isostatic pressing)）密封上述缝隙 / 开口密封来使包覆的密封剂为气密性的。避免存在缝隙和开口很重要，因为液体致冷剂朝着导线的金属稳定剂层渗透可在故障期间引起气泡成核和沸腾。

[0067] 另一类密封剂或稳定剂是经历诸如熔化或晶体结构相变等吸热相变的材料。较佳使用在 HTS 导线的工作温度之上（但低于 HTS 材料的最高容许温度）的某一温度下经历此类吸热相变的材料。吸热相变的实例是例如低熔融温度有机或无机材料的熔化，这些材料可 :添加于密封剂 264，作为复合增强材料中的离散包埋颗粒 ;作为可施用于密封剂 264 的表面 / 界面的凝胶 / 油漆进行添加 ;或选择性地添加于密封剂 264 的某些区域（例如边缘、圆角、或内部管道区域）。吸热相变还可包括例如某些金属间相变、有序相变、或其它二级相变。例如，被选用于密封剂 264 的材料可在 -160℃至 -70℃范围内熔化，该材料在约 -50℃以上沸腾（较佳地具有高于环境温度的沸点），以便在液体和复合状态下相对容易且经济地进行密封剂 264 的施用（即作为油漆、薄膜涂层、乳液或凝胶）。

导线和电缆设计标准概述

[0068] 上述 HTS 导线设计标准（即具有较厚稳定剂层、中间电阻率值、以及密封剂）基本上不同于用于使用第一代 HTS 导线的现有故障电流保护 HTS 电缆和具有由高导电率（在 77K 温度范围内 < 0.5w 微欧 - 厘米）银形成的基质 (matrix) 的多芯复合材料 (multifilamentary composite) 的标准。在此类现有故障电流保护 HTS 电缆中，目标是在 HTS 导线中或 HTS 电缆结构中使用导电率尽可能高的材料，包括在电缆中使用大量的铜。用于 FLC 电缆中的 HTS 导线设计也基本上不同于用于独立 FCL 或 SUPERPOLI 母线的设计标准，在所述独立 FCL 或 SUPERPOLI 母线中，使用电阻率非常高的材料并使任何稳定剂层保持尽可能薄以保证短模块长度中具有高电阻。具体而言，对于独立 FCL 或 SUPERPOLI 母线，使用块状超导体（其在被冷却至其正常电阻性状态时在 90 ～ 110K 温度范围内可具有 100 微欧 - 厘米的电阻率）或使用涂敷的导体导线，以及如不锈钢等高电阻衬底。这些衬底在 77K 温度范围内具有超过 20 微欧 - 厘米、在某些情况下高达 70 微欧 - 厘米的电阻率。

公用事业电网中的工作

[0069] 还参照图 6，图中示出故障电流限制 HTS 电缆 150 在公用事业电网 300 环境 (context) 中的工作。在此具体实例中，公用事业电网 300 被示为包括 765kV 总线 302、69kV 总线 304、以及 34.5kV 总线 306。此外，公用事业电网 300 被示为包括三个 138kV 变电站 20、308、310，其中每一个变电站通过三个 69kV 变电站 24、312、314 向 69kV 总线 304 供电。三个 34.5kV 变电站 316、318、320 可从 69kV 总线 304 向 34.5kV 总线 306 供电。故障电流限制 HTS 电缆 150 被示为耦合在变电站 20 与 24 之间。

[0070] 当在公用事业电网 300 内出现故障电流（例如故障电流 124）时，各电流分量 322、324、326、328、330、332（即通过 HTS 电缆 150 的那部分故障电流 124）可通过所有可用于馈送故障电流 124 的路径而从所有互连的变电站流出，其可能表现为置于公用事业电网 300

上的非常大的负载。当计算在故障条件期间可实现的电流分量时，故障电流 124 可被模型化为对地短路。

[0071] 还参照图 7 和 8，当确定特定变电站（例如变电站 20）在例如故障电流 124 中贡献多大的故障电流时，可将开路发电电压模型化为理想电压源 350。此外，上游阻抗（即从 HTS 电缆 150 上游看时的阻抗）可与变压器（即变电站 20 的变压器）阻抗组合并被表示为源阻抗 352。此上下文中的阻抗可以是由有功分量和无功分量组成的复数向量。在数学上，阻抗 (Z) 等于 R+jX，其中 R 是有功（即电阻性）分量且 X 是无功（即电感 / 电容性）分量。在本实例中，无功分量是电感性阻抗且等于 $j\omega L$，其中 $\omega = 2\pi f$，f 是电流的频率（例如在北美洲为 60Hz）。

[0072] HTS 电缆 150 被示为端接至地线 354，因为，如上所述，故障电流 124 被模型化为对地短路。可使用欧姆定律来确定由变现站 20 提供的故障电流（即电流分量 332）的预期水平。通过对电网 300 内的其它变电站使用这种方法，可计算总体故障电流贡献量（即，例如电流分量 322、324、326、328、330 的值），并可确定预期通过 HTS 电缆 150 的故障电流分量（即电流分量 332）。遗憾的是，电流分量 332 可高于断路器 34、36 能够处理的水平。因此，HTS 电缆 150 可被设计为将此原本预期出现的故障电流分量 332 限制至断路器 34、36 能够处理的较低预定水平。

[0073] 如图 6 中的线路 304 和 306 所示，故障电流限制 HTS 电缆的另一重要应用是在建立不同变电站内的母联、或更重要的是母联之间的互连的应用中。这些互连允许根据电网负载要求而在不同的变电站或不同变压器之间共享电力，同时保持控制在实现此类互连时原本会增大的故障电流。

故障电流限制 HTS 电缆的设计

[0074] 当设计故障电流限制 HTS 电缆时，可配置 HTS 电缆 150 的一个或多个特性，以便在故障电流期间在 HTS 电缆 150 内发生的任何温升（ΔT）均处于最大温升（即 ΔT_{max}）以下，因为超过 ΔT_{max} 可导致氮气泡的形成。如上所述，氮气泡的产生可降低介电层的介电强度并可导致 HTS 电缆 150 的电压击穿和损坏。同时，HTS 电缆 150 可被设计为足够长（即，在最小长度以上）以提供足以在 HTS 电缆 150 内的 HTS 导线被驱动至其正常（即电阻性）状态时限制故障电流的电阻。

[0075] 因此，当设计 HTS 电缆 150 时，可进行关于例如 HTS 电缆 150 的最高容许工作温度的确定 400。对于压力为 15 巴的液氮冷却的 HTS 电缆，最高容许工作温度接近于 110° K（即在 15 巴下液氮的沸点）。因此，对于被低温冷却至 72° K 的液氮，ΔT_{max} 为 38° K，或者，为了提供一些设计裕度，将 ΔT_{max} 选为 30° K。这些是实际 HTS 电缆的典型值，但是压力和温度可根据具体设计而异。

[0076] 如上所述，所有电缆（传统电缆和 HTS 电缆两者）均在一定程度上使故障电流衰减，因为所有电缆均具有有功阻抗和无功阻抗。然而，即使当 HTS 导线停止导电而进入其正常状态时，具有大量铜的典型故障电流保护 HTS 电缆也具有非常低的电阻性阻抗。因此，由停止导电的 HTS 导线的电阻而引起的最大故障电流的降低非常小，可能是 1％或以下，且远远小于能在公用事业电网的运行中提供显著改善的最低水平 10％。另外，如上所述，当通过 HTS 电缆 150 的电流超过（上文定义的）临界电流水平时，HTS 电缆（例如 HTS 电缆 150）

中的有功和（在较低程度上）无功阻抗分量可增大几个数量级。因此，如果被恰当地设计为不包括铜且以其稳定剂优化导线电阻，则HTS电缆150可充当故障电流限制装置，并可使故障电流衰减至比超导临界电流低几倍的水平，从而使最大故障电流水平减小超过10％。具体而言，HTS电缆150可被设计为将故障电流限制至f因数乘以临界电流的（上文定义的）的值。

[0077] 到目前为止的所有重要现有技术HTS电缆实证（demonstrations）均在超导体和极接近于超导体的低温冷却温度下包括大量的铜。因此，在故障电流超过临界电流水平的情况下，大多数故障电流在铜中传导，现有技术HTS电缆的热容量增大，且现有技术HTS电缆内的温升受到限制。虽然这可保护现有技术HTS电缆免受损坏，但由于具有大量的高导电率、低电阻铜，此结构几乎不降低故障电流的幅值。

[0078] 对于HTS电缆150，去除了高导电率的铜（和/或其它高导电率材料）并利用具有相当厚（例如总厚度为100～600微米、或较佳地200～500微米）的稳定剂的HTS导线（如上所述），所述稳定剂具有相当高的电阻率（0.8～15微欧-厘米，或较佳地1～10微欧-厘米）。HTS电缆150的长度应足够长（例如通常大于200m），以便经冷却稳定化的HTS电缆150的总电阻大到足以将最大故障电流降低至近似因数f乘以临界电流。

[0079] 在提供挠性和高容量HTS电缆150的同时实现此期望结果的能力的基础是使用经涂敷的HTS导体导线250（如上所述及如图5所示）。HTS层258应相当薄，并应包括相当厚的稳定剂层252、253（即通常比HTS层258和衬底层254厚）。HTS层258应具有高载流容量（例如在77K下每平方厘米大于1兆安）。工作温度下的每单位导线宽度的典型临界电流$I_{c,w}$为350A/cm宽度，但来自不同实验室或商业制造商的不同导线的值可在100A/cm宽度至1000A/cm宽度范围内。于是，当HTS导线250切换到电阻性状态时，HTS导线250的电阻应相当高，导致几乎所有的电流均转移到稳定剂层252、253。HTS导线150应具有足够的挠性以便能够在HTS电缆150内进行螺旋缠绕。在实际中，挠性要求可将组合稳定剂层252、253的总厚度限制至约600微米。

[0080] 为了说明的目的，我们假设变电站20为三相13.8kV变电站。因此，由变电站20提供的线对地电压为7.97kV。此外，假设故障电流分量332的未被限制值为40kA，并假设X/R源阻抗比为5（即典型值）。因此，根据$40kA = 7.97kV/(R_s^2+X_s^2)^{1/2}$和$X_s/R_s = 5$，确定402源阻抗352的有功（Rs）和无功（Xs）阻抗值为0.039+j0.195Ω。对于此计算和随后的计算，使用线对地电压（V_{LG}）将给定线对线电压（V_{LL}）的三相系统模型化为等效的单相模型，其中$V_{LL} = V_{LG}*(3)^{1/2}$。

[0081] 对于本实例，进一步假设HTS电缆150的长度为（L_{cable}）为1200米，且额定值为3000安培（rms）或$3000A_{rms}$（即，以均方根安培数表示I_{rated}）。如上所述，HTS电缆150的内冷却剂通道152可沿径向依次被第一HTS层102和第二HTS层104所围绕。由于第一HTS层102和第二HTS层104的导线被以螺旋形式缠绕在内冷却剂通道152周围，所以包括在HTS层102、104内的各HTS导线（例如HTS导线250）的实际长度长于HTS电缆150的长度。对于本实例，采用螺旋因数1.08，其中HTS导线的实际长度比HTS电缆150的长度长8.00％。

[0082] 另外，对于本实例，假设HTS电缆150被设计为在I_{rated}的1.6倍下变为正常。此因数可称为跳闸电流因数f_{tc}。因此，HTS电缆150可被设计为在直至$4,800A_{rms}$以内表现出

超导特性。则在其工作温度下，电缆的临界电流为 4,800×1.44 = 6,787A。

[0083] 当构造 HTS 电缆 150 时，可配置 404 许多设计参数，其实例可包括但不限于：HTS 导线宽度 (W)；每单位宽度的临界电流 ($I_{c,w}$)；跳闸电流因数 f_{tc} f 因数（参见下文）；稳定剂或复合材料电阻率（ρ）；稳定剂或复合材料厚度 (t)；导体比热 (C)；故障电流持续时间（τ）；每相中的导线数 (N)；以及电缆电感 (X)。总 HTS 电缆临界电流可以是 $I_{c,w}$ WN。通过配置 404 这些设计参数，可调节 406 HTS 电缆 150 的阻抗和 / 或可将 HTS 电缆 150 配置为使通过 HTS 电缆的故障电流衰减至总电缆临界电流乘以 f 因数，这对于典型电网条件而言远大于原始最大故障电流的 10％。

[0084] HTS 导线宽度 (W)：此设计参数指的是 HTS 层 102、104 内利用的各单独 HTS 导线（例如 HTS 导线 250）的宽度。对于本实例，假设 HTS 导线宽度 (W) 为 0.44cm，此可从 American Superconductor(344 超导体）购得。此宽度主要取决于以螺旋方式在电力电缆的挠性成形体周围缠绕 HTS 导线的机械要求。

[0085] 每单位宽度临界电流 ($I_{c,w}$)：此设计参数指的是在上述标准电场准则下各单独 HTS 导线在带状导体的每单位宽度上可实现的最大电流水平。对于本实例，假设在工作温度下的每单位宽度临界电流 ($I_{c,w}$) 为每厘米宽度 350 安培（即 A/cm 宽度）。此参数主要取决于电缆的要求额定值和使用于制造 HTS 电缆的 HTS 导线的数目 (N) 最少化这一需要。

[0086] 跳闸电流因数 f_{tc}：如上所述，典型的公共事业设计要求是 f_{tc} = 1.6.

[0087] f 因数 (f)：首先由 Kraemer 等人提出（参见 IEEE Trans.on AppliedSuperconductivity，Vol.13，No.2，2003 年 6 月，pp.2044-7 中由 H.-P.Kraemer 等人所著的“Switching Behavior of YBCO Thin Film Conductors in Resistive FaultCurrent Limiters”）的此设计参数指的是 HTS 层 102、104 变为完全正常或电阻性时的电流与临界电流之比。如上所述及在本实例中，HTS 电缆 150 在 4,800A_{rms}（或约 6,790A 峰值）下变为正常。通过将此峰值值（即 6,790A）乘以 f 因数，可确定使 HTS 电缆 150 完全正常（非超导）时的值。由 Siemens 对 YBCO 薄膜进行的第一次确定（参见 IEEE Trans. on Applied Superconductivity，Vol.13，No.2，2003 年 6 月，pp.2044-7 中由 H.-P.Kraemer 等人所著的“Switching Behavior of YBCO ThinFilm Conductors in Resistive Fault Current Limiters”）得到约为 2 的 f 因数。对于涂敷 FBCO 的导体导线，此 f 因数预期处于相同的范围内（例如 1 ～ 4 范围内）。对于本实例及后续实例，我们根据 Siemens 结果而采用 f 因数等于 2。因此，及对于上述实例，我们估计 HTS 电缆 150 在约 6,790 安培的 2 倍（即 f 因数）下或约 13,580 安培下将完全正常（即为非超导性）。因此，用经适当配置的 408 电缆（参见下文），可将 40,000A_{rms}(56,600A_{peak}) 的故障电流限制至 13,580A_{peak}。这表示故障电流被减小 76％，明显大于电网的有用运行改善所需的等于 10％的最低水平。

[0088] 电阻率（ρ）：此设计参数（也可称为比电阻）是材料阻碍电流流动的强度的量度。通常，电阻率（ρ）是温度的函数，并可表示为 ρ_{xx}，其中“xx”定义计算电阻率时的温度。对于本实例，假定 90° K 温度下的电阻率 (ρ_{90}) 为 4.0 微欧 - 厘米，并且为方便起见，我们在以下估计中假设在 70 ～ 110K 范围内的温度依赖性可忽略。此类电阻率可在例如黄铜中存在。可改变锌的浓度以控制电阻率，合金中的锌越多，电阻率越高。许多其它合金可显示出电阻率随合金组成的类似变化；因此，对于稳定剂材料，有多种选择。

[0089] 稳定剂厚度 (t)：此设计参数指的是包括在 HTS 导线 20 内的稳定剂层 252 的厚度。

对于本实例，假设总稳定剂厚度（t）约为350微米。更精确而言，包括衬底层、超导体层、覆盖层、焊料层、稳定剂层、以及密封剂的HTS导线可以是多层复合材料，且可用HTS导线的净复合材料电阻率和厚度来表征。由于稳定剂层是导线的主要部分，所以多层复合材料的电阻率可接近于稳定剂层的电阻率。然而，在下文中为便于估计，我们假设在电缆的停止导电状态下电流主要在稳定剂层中流动。此外，此类改进对于本领域的技术人员来说是显而易见的。

[0090] 每单位体积的比热（C）：此设计参数指的是每体积的复合材料HTS导线的比热，所述复合材料HTS导线包括衬底层、HTS层、覆盖层、焊料层和稳定剂层。对于HTS导线所使用的典型材料，在约77K的温度下，C接近于2Joules/cm^3K。为简单起见，我们假设在温度范围70～110K内自始至终为该值，尽管对于某些材料，C可能在此范围内改变10～20％。如果HTS导线包括导电性不良的密封剂，则当热扩散可使导线热化而使其达到恒定温度时，该密封剂可在几秒钟之后增加导线的比热。作为对下文的温升计算的简单近似，我们可通过假设使复合材料的比热增加了因数倍$1+(C_i t_i/C_t)$来近似表示密封剂的效果，其中，下标i指的是密封剂。在大多数情况下，在77K温度范围中的密封剂热容量也约为2Joules/cm^3K，因此，对于厚度与复合材料导线一样的密封剂，此因数为2。

[0091] 故障电流持续时间（τ）：此设计参数指的是快速开关组件202或断路器34、36使HTS电缆150从电网部分10'断开之前的时间。期望使此时间尽可能短，以使作为热量积聚在电缆中的能量最小化，并从而使温升最小化。容易购得的最快开关及其感测电路可在四个周波（即67毫秒）内断开。因此，故障电流持续时间被视为67毫秒。如果将来可得到甚至更快的开关，则理想的是使用那些开关。

[0092] 导线数（N）：此参数指的是包括在HTS电缆每相的相导体内的导线的总数。通常，这些导线被布置在两个HTS层中（例如HTS层102、104），并以螺旋方式缠绕，其中这两个层具有相反的缠绕方向（即螺旋度）。对于在工作温度下每单位宽度的临界电流为350A/cm宽度、允通电流因数为1.6、且导线宽度为0.44cm的额定值为3,000A_{rms}的电缆，所需导体数N为44。

[0093] 电抗（X）：此设计参数指的是每单位长度的电感，由在给定电流下所产生的每单位长度的磁通量来确定。对于本实例，假设电感（X）为0.017mH/km，此为处于超导状态的下述Triax电缆所特有的。

[0094] 由于变电站20（在本实例中）为三相13.8kV变电站，所以HTS电缆150可以是Triax电缆（例如由Ultera提出的Triax HTS电缆布置，Ultera是位于Carrollton,GA.的Southwire公司与位于德国Cologne的nkt cables公司的合资企业）。每相均由两层螺旋缠绕组成，并全部被同轴配置且被电介质隔开。将需要去除来自Ultera的此Triax电缆中的铜绞线，并将需要使用上述导线将Triax电缆修改为FCL电缆。

[0095] 可用上文给定的参数如下计算图7所示的处于停止导电状态的HTS电缆150的阻抗（Z）的电阻性分量$R_{hts(quenched)}$：$R_{hts\,(quenched)}=\frac{(\rho_{90})(L)}{(t)(W)(N)}$

$$R_{hts\,(quenched)}=\frac{(4.0\,\mu\Omega\,\mathrm{cm})(1.08\times 120{,}000\,cm)}{((0.0350\,\mathrm{cm})(0.44\,\mathrm{cm})(44)}\quad R_{hts(quenched)}=0.765\,\Omega$$

[0096] 与此相对大的电阻性阻抗相比，电缆的电感性阻抗可忽略。对于典型电缆，在给定

0.017mH/km的样本值的情况下，可计算等效电感 L_{hts} 为 0.017mH/km*1.2km = 0.0204mH。无功阻抗 X = jωL，其中 ω = 2πf，且 f 是电流的频率（例如在北美洲为 60Hz），由此得到 X_{hts} = 0.00769Ω，其比 $R_{hts(quenched)}$ 小 100 倍。

[0097] 在上文给定的源阻抗 0.039+j0.195Ω 的情况下，使用欧姆定律和图 7 所示的等效电路，可使用标准基尔霍夫定律 (Kirchhoff's laws) 计算出 HTS 电缆 150 的一相两端的压降 (V_{cable}) 为 7,348V_{rms}。通过HTS电缆150的相应均方根电流 (I_{cable})356 为 $V_{rms}/R_{hts(quenched)}$ = 9,604A_{rms}，此对应于 9604×1.414 或 13,580A 的峰值电流。因此，电流分量 332 从 40,000A_{rms} 减小至 9,604A_{rms}（即减小 76.0%）。

[0098] 如上所述，在故障电流期间在 HTS 电缆 150 内发生的温升 (ΔT_{max}) 应被保持在低于最大温升 (ΔT_{max}) 的水平，因为超过 ΔT_{max} 可导致氮气泡的形成。

[0099] 当确定 410HTS 电缆 150 的实际工作温度时，可根据简单的绝热计算，通过使热产生的 $\rho_{90}J^2\tau$（其中停止导电的超导体导线中的均方根电流密度为 $I_{cable}/WNt = fl_{c,w}\sqrt{2t}$）等于热吸收的 CΔT 来确定 HTS 电缆 150 所实现的温升 (ΔT)。根据此关系，可使用上文给定的参数如下计算 ΔT：$\Delta T = \frac{(\rho_{90})(I_{cable}^2)(\tau))}{((W)(N)(t))^2)(C)}$

$$\Delta T = \frac{(0.000004\Omega cm)(9604\ A)^2(0.067\ sec)}{((0.44cm)(44)(0.035cm))^2(2\ Joules/cm^3K)}$$ ΔT = 26.9° K

[0100] 因此，由于 HTS 电缆 150 所实现的温升 (ΔT) 小于最大容许温升 (ΔT_{max})，所以不会形成氮气泡，电介质层的介电强度不会降低，且 HTS 电缆 150 不会存在会对电缆造成永久性损坏的电介质击穿的风险。具体而言，对于压力为 15 巴的 HTS 电缆，液氮的沸点为 100° K。因此，对于以被过冷至 72° K 的液氮工作的电缆，26.9° K 的温升 (ΔT) 使得实际工作温度为 98.9° K，与液氮的 110° K 沸点相比较 412，该实际工作温度为安全工作温度。

[0101] 根据以上等式，显然，增大分母的值会使温升 (ΔT) 减小，而增大分子的值则使温升 (ΔT) 增大。因此，故障电流持续时间 (τ) 和/或电阻率 (ρ_{90}) 的增大可使得温升 (ΔT) 增大。相反，稳定剂厚度 (t) 或比热 (C) 的增大可使得温升 (ΔT) 减小。导线宽度 W 和导线数目 N 已由电缆绞合的实际要求和电缆额定值以及导线的每单位宽度的临界电流确定。

[0102] 同时，电缆中的 HTS 导线的长度必须足够长以实现要求的电阻。由于 a) 最大限制电流是 f 因数乘以每单位宽度的导线临界电流再乘以所有导线的总宽度 WN，以及 b) 电阻为 ρL/WNt，所以 HTS 电缆 150 中的导线的最小长度为：$L_{min} = (V_{peak})(t)/(f)(I_{c,w})(\rho)$ |[方程式 1]

[0103] 用以上值：

$$L_{min} = (1.414x7348\ V)(0.035cm)/(2)(350\ A/cm)(0.000004\ \Omega cm).$$

$$L_{min} = 1{,}300\ m$$

[0104] 将螺旋因数 1.08 考虑在内，此长度对应于最初采用的 1,200m 的电缆长度。请注意，对于较长的长度，电缆中任何位置的最大温升 (ΔT) 将保持在以上计算的水平，只要电流被限制至 $fl_{c,w}WN$ 即可。在这种情况下，只有一部分 HTS 导线将以 Siemens 所示的方

式停止导电（参见 IEEE Trans.on AppliedSuperconductivity，Vol.13，No.2，2003 年 6 月，pp.2044-7 中由 H.-P.Kraemer 等人所著的“Switching Behavior of YBCO Thin Film Conductors in Resistive FaultCurrent Limiters”），且受限制的电流保持在 $fl_{c,w}WN$ 的水平。然而，对于较短的长度，HTS 导线在停止导电状态中的电阻将减小，且对于给定电压，电流将根据 $I = V/R_{hts,\,quenched}$ 而增大。这可导致更强的受热和根据上文给定的 ΔT 方程式而增大的温升。因此，电缆长度必须大于以上计算的值（即 1,300 米）。

[0105] 请注意，还可如下计算温升：$\Delta T = \rho (fl_{c,w}/t)^2 \tau /2C$ ［方程式 2］

[0106] 根据这最后两个方程式－被称为方程式 1 和 2，可以看出，如果希望通过增大电阻率 ρ 或临界电流密度 $l_{c,w}$ 或减小稳定剂厚度 t 来减小最小导线和电缆长度，则温升 ΔT 将增大。或者，通过使用密封剂来增大热容量可减小温升。例如，使热容量加倍可在电阻率增大一倍的情况下使温升相同，且这可将最小电缆长度减小为二分之一。请注意，除了取决于电缆的工作额定值和每单位宽度的临界电流 $I_{c,w}$ 或 HTS 导线外，这些方程式并不取决于导线宽度 W 或导线数目 N。

[0107] 此电缆设计分析的结论是对于其中全部故障电流流过 HTS 电缆 150 的应用，13.8kV 级配电系统中 FCL HTS 电缆的最小长度在千米范围内。这可通过例如使用如上所述的较高热容量而进一步减小。本领域的技术人员可根据上文给出的方程式或根据将所有参数的温度依赖性考虑在内的更完整分析来计算在其它电压和参数条件下的最小长度。

[0108] 然而，如果在电缆 150 两端直接提供并联阻抗（例如从图 4 中的断路器 34 至断路器 36），则可显著降低电缆 150 的电压。例如，我们在 13.8kV 系统中将源阻抗视为 0.2Ω（电感性），其对应于单相电压为 $8kV_{rms}$ 的 $13.8kV_{rms}$ 电网中的单相故障电流 $40kA_{rms}$。与 HTS 电缆 150 并联的 0.046Ω 的传统电感性阻抗可将电缆 150 上的电压降低至 $1,500V_{rms}$ 并给出 32.5kA 的故障电流。在此种降低的电压和以上参数（包括图 5 中使用密封剂 264 而将热容量增大到两倍）条件下，临界长度公式得到约为 100m 的最小电缆长度。因此，对于 13.8kV 的电网，FCL 电缆可被设计为具有短至 100m 的长度，条件是可使用并联阻抗。

[0109] 对于长度更长的电缆，可降低电阻率，并相应地减小温升。这可具有缩短电缆返回至其原始工作温度的恢复时间的优点。例如，对于 4.8 米长的电缆，上述实例中的电阻率可被降低至 1 微欧－厘米，且温升可从 26.9K（无图 5 的密封剂 264）降低至 6.7K。

[0110] 将来，有可能获得更快的开关组件。在这种情况下，可缩短故障持续时间 τ 并可允许更大的电阻率。例如，对于 27 毫秒的故障持续时间，电阻率可被增大至 10 微欧－厘米，且电缆的最小长度可被减小 2.5 倍（10 微欧－厘米除以 4 微欧－厘米）。

[0111] 因此，可用 1 ～ 10 微欧－厘米范围内的电阻率来实施本文所揭露的 FCL 电缆的概念，并且通过对上述参数进行某些进一步调整，此范围可扩展至 0.8 ～ 15 微欧－厘米。然而，铜的 77K 低电阻率（0.2 微欧－厘米）或不锈钢的高电阻率（50 微欧－厘米）不在实际连续挠性长距离 FCL 电缆的范围内。

[0112] 稳定剂厚度 t 和 $I_{c,w}$ 的参数可进行相应的修改，虽然在这两种情况下，其均可受到电缆要求（即稳定剂不能过厚以避免使 HTS 导线对于电缆来说过硬）和满足公共事业额定电流这一需要的约束。

[0113] 对于诸如 138kV 等输电水平电压，可在包括密封剂的情况下估计最小长度，所述密封剂使热容量增大到 2 倍且电阻率从 4 增大至 8 微欧－厘米。根据长度公式（上述），

将电压与 13.8kV 级配电系统相比增大到十倍并将电阻率增大到两倍意味着最小长度为 (10/2)×1.2km 或 6km。对于输电水平电缆，此类长度很常见，这表明所述 FCL 电缆设计在这种情况下也可行。

[0114] 本发明的另一实施例是包括多于一种 HTS 导线的 HTS 电缆，所述 HTS 导线例如为基于 HTS 材料 BSCCO（铋锶钙铜氧化物）的导线和基于 HTS 材料 YBCO（稀土或钇钡铜氧化物）的导线。不同的超导材料可具有从超导到正常状态的不同转换特性。例如，YBCO 具有比 BSCCO 更急剧的转换，这使其在 FCL 应用中更有效，即使这两种材料在过去（例如在 SUPERPOLY 项目中）均已被用来证明 FCL 特性。在本实施例中，可通过增加由涂敷有 YBCO 的导体导线制成的足够长的超导电缆部分，将由 BSCCO 导线制成的 HTS 电缆设计并操作为充当故障电流限制电缆。这可通过在 YBCO 部分中绞接被设计用于 FCL 运行的电缆来实现。在正常工作条件下，这两部分均是超导性的。

[0115] 上文已描述了许多实施方式。尽管如此，应理解，可以进行各种修改。因此，其它实施方式也在权利要求书的范围内。

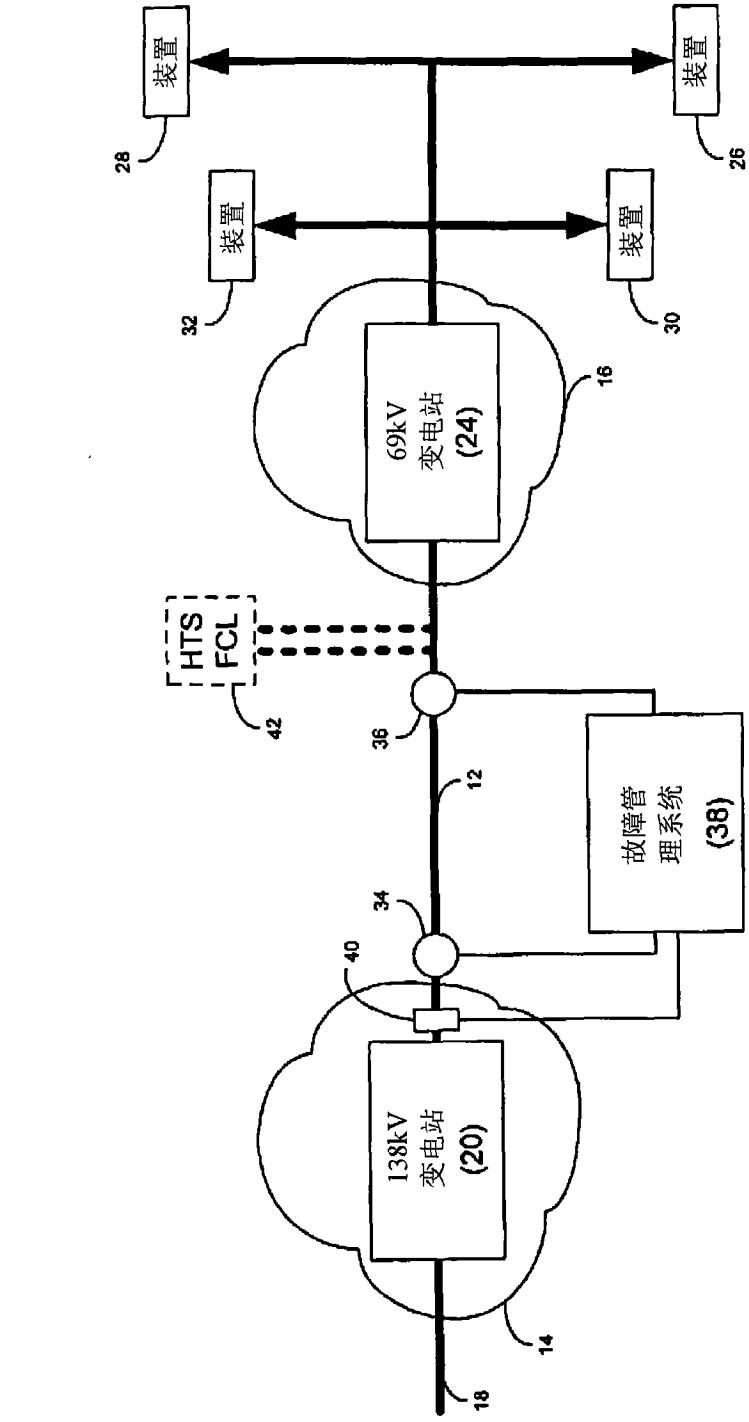

装置
装置
装置
装置
28
26
32
30
69kV
变电站
(24)
16
HTS
FCL
42
36
12
故障管
理系统
(38)
34
40
138kV
变电站
(20)
14
18
10

图 1

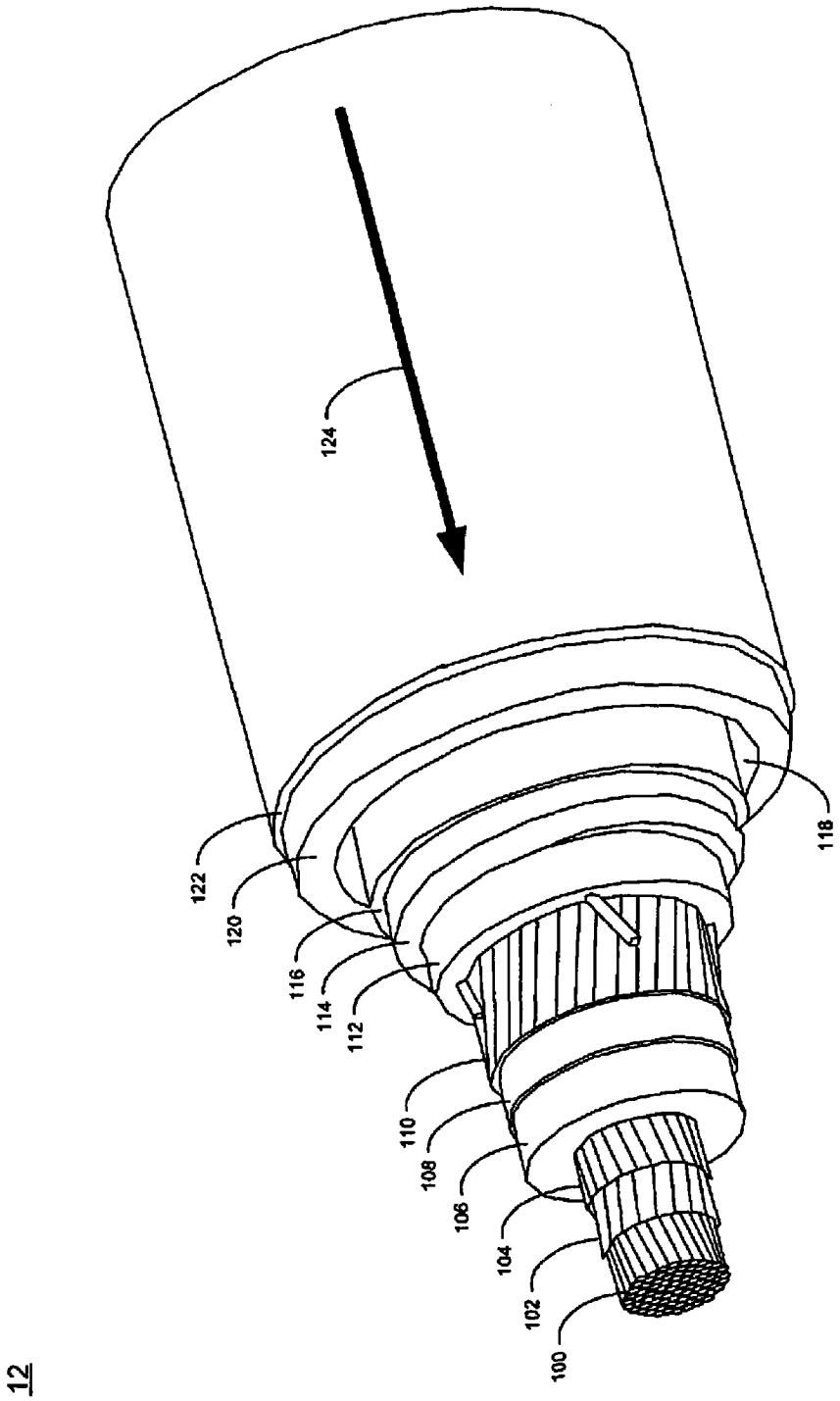


图 2

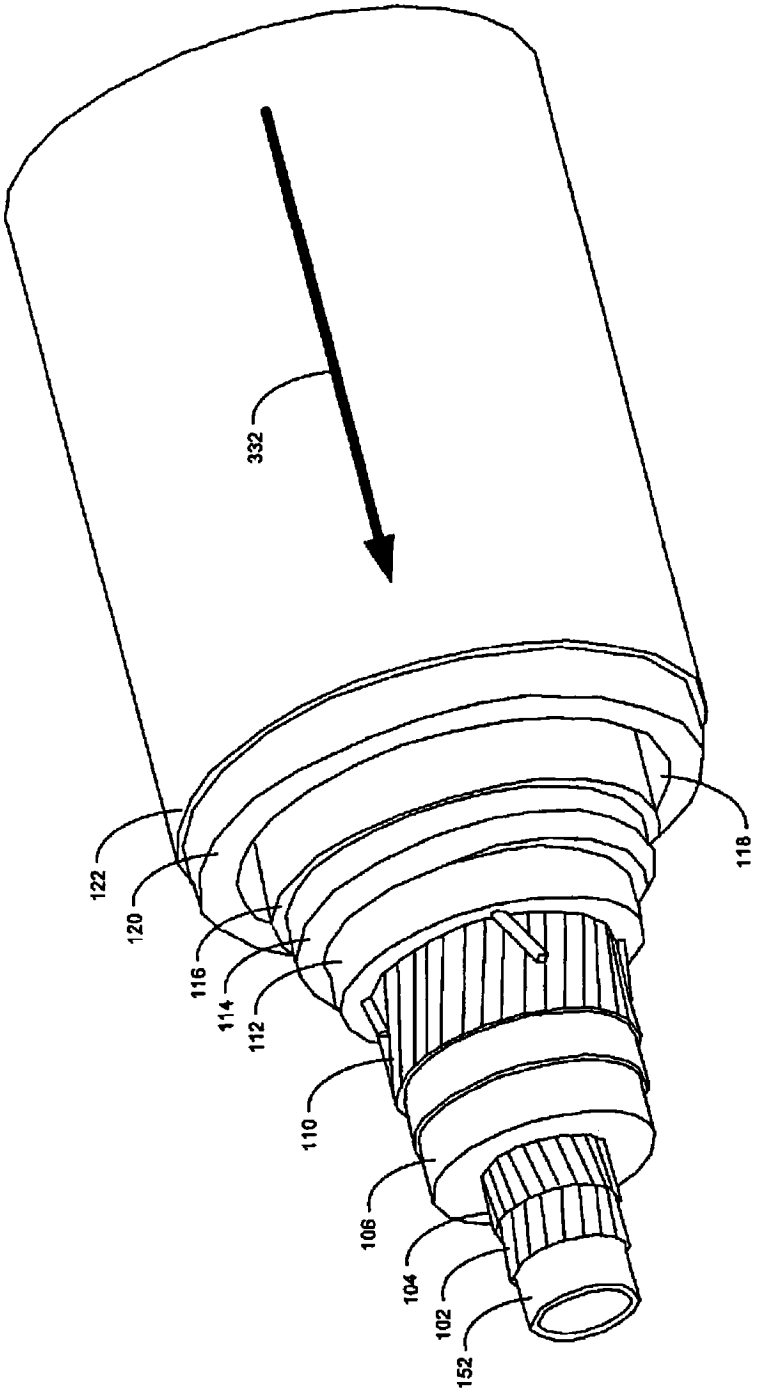


图 3

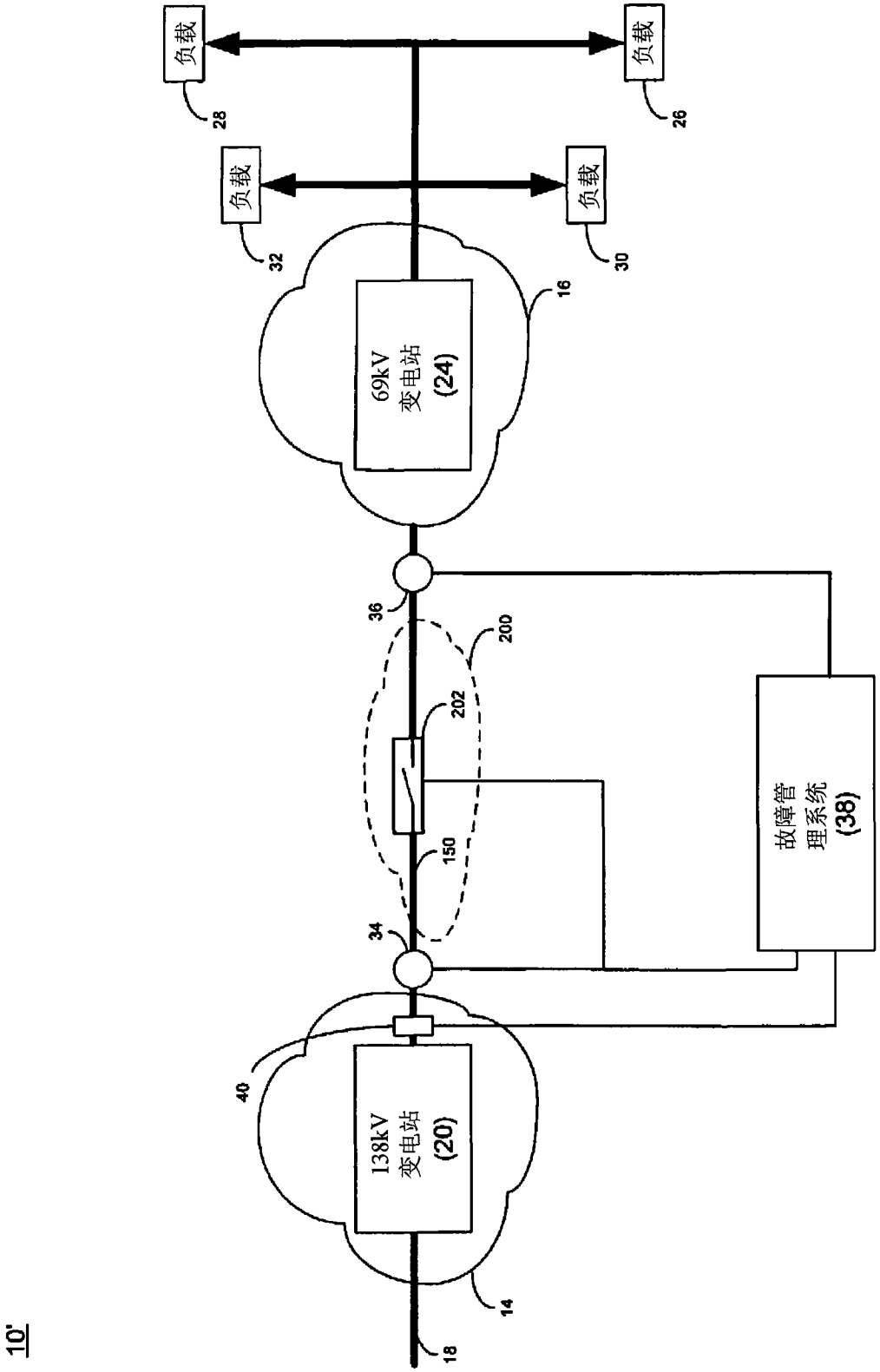

负载
负载
负载
负载
28
26
32
30
16
69kV
变电站
(24)
36
200
202
150
34
故障管
理系统
(38)
40
138kV
变电站
(20)
14
18
10'

图 4

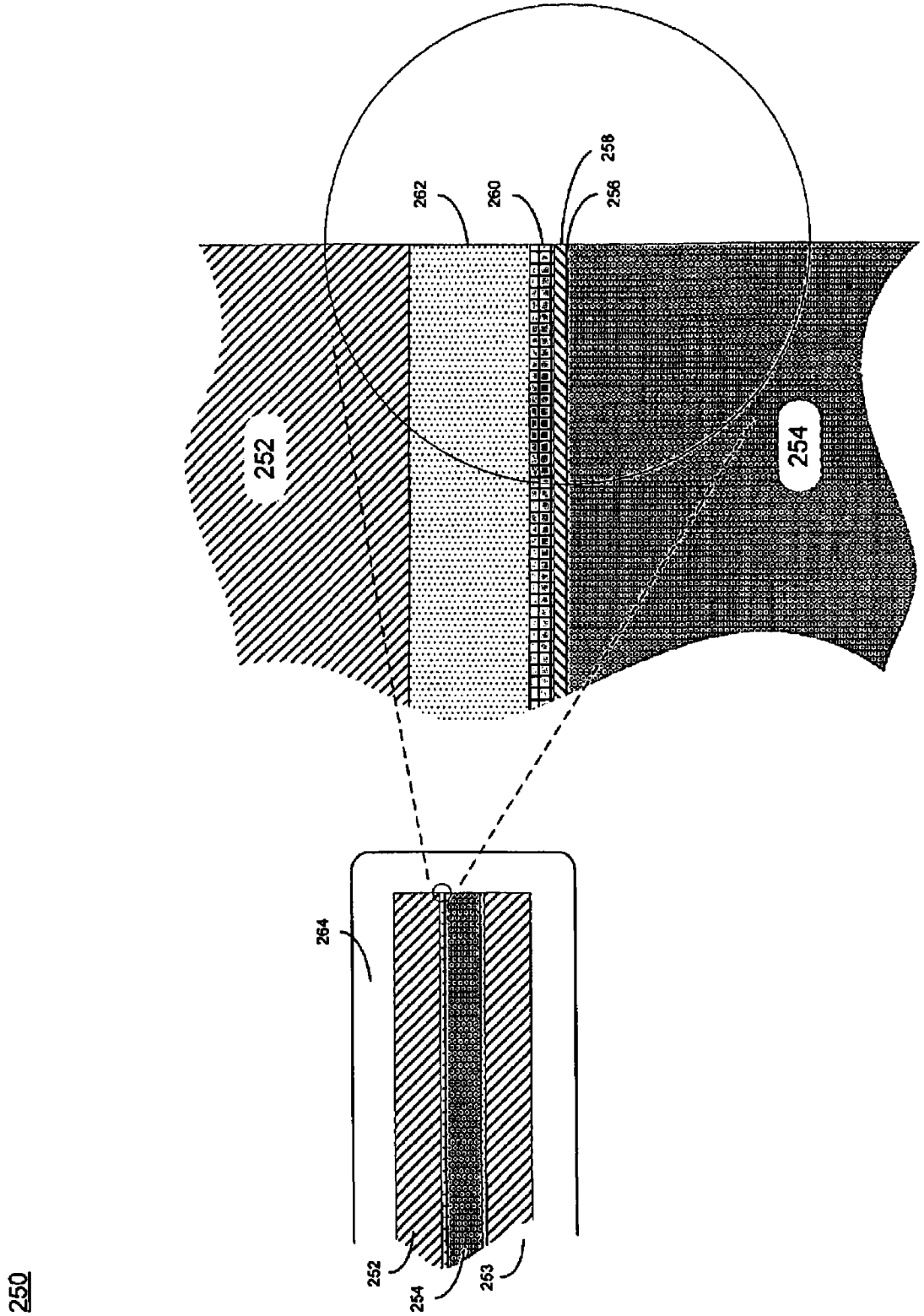


图 5A

250'

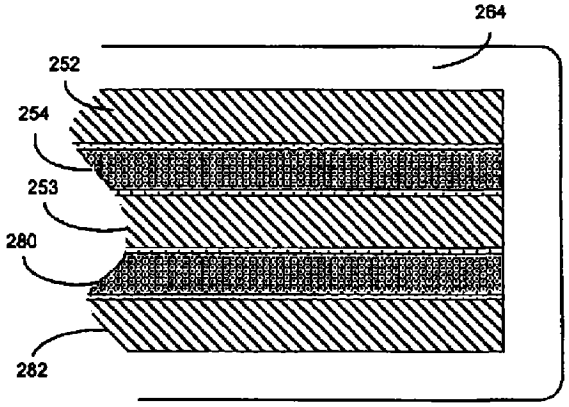


图 5B

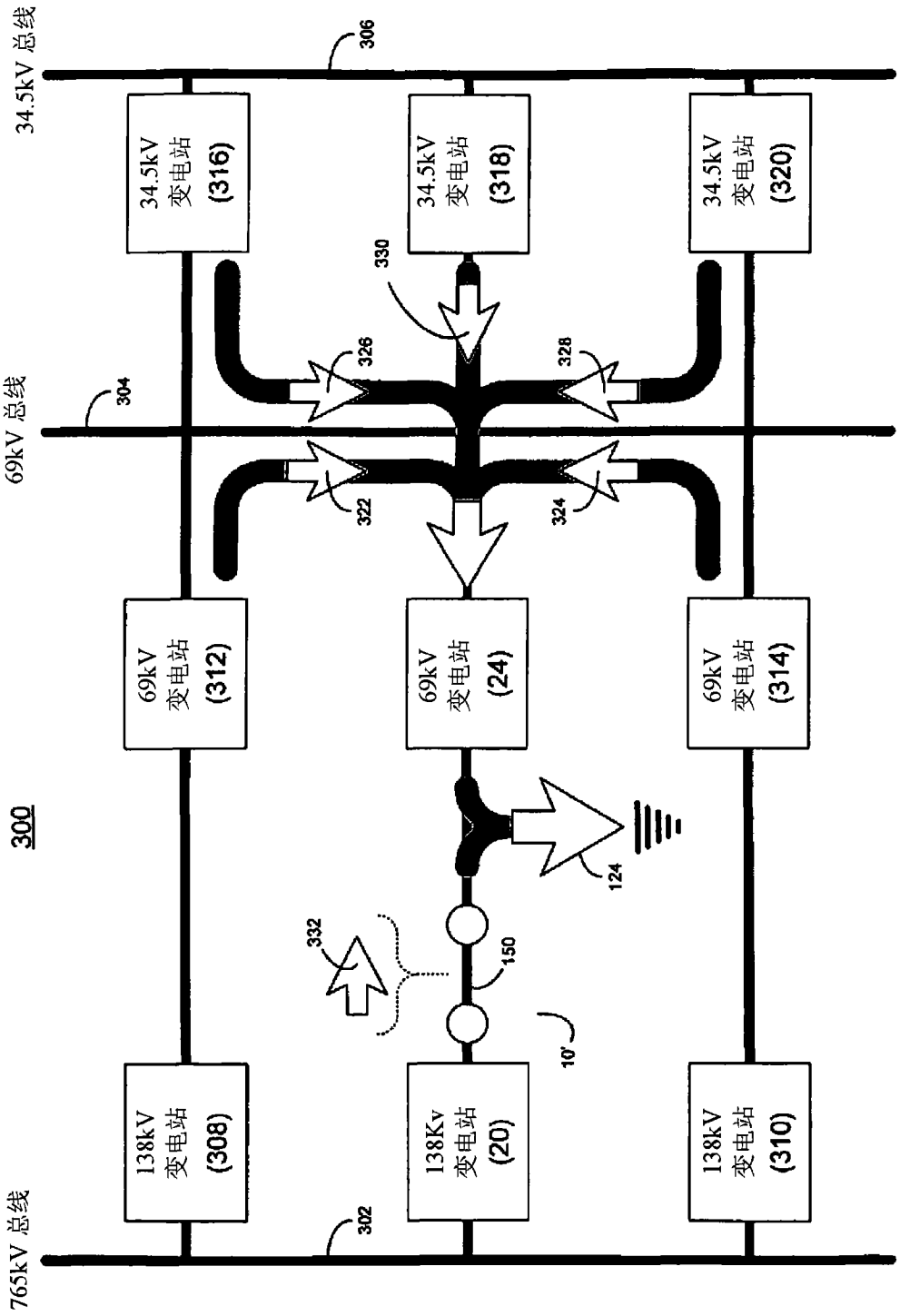

34.5kV 总线
306
34.5kV 变电站 (316)
34.5kV 变电站 (318)
34.5kV 变电站 (320)
330
326
328
69kV 总线
304
322
324
69kV 变电站 (312)
69kV 变电站 (24)
69kV 变电站 (314)
300
124
332
150
10'
138kV 变电站 (308)
138Kv 变电站 (20)
138kV 变电站 (310)
765kV 总线
302

图 6

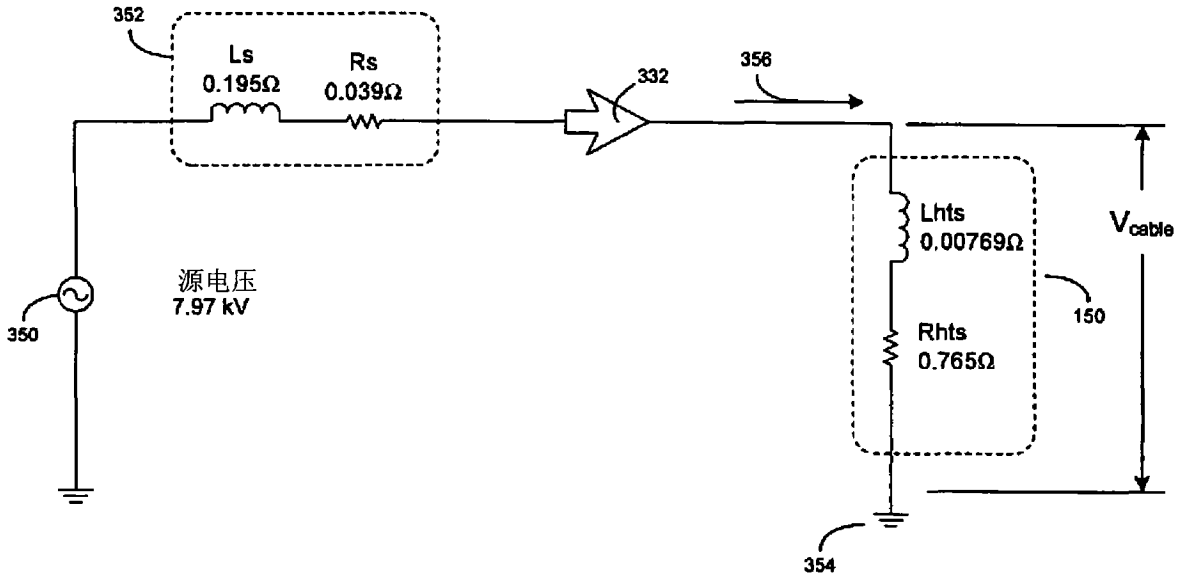

352
Ls
0.195Ω
Rs
0.039Ω
332
356
Lhts
0.00769Ω
Rhts
0.765Ω
150
Vcable
源电压
7.97 kV
350
354

图 7

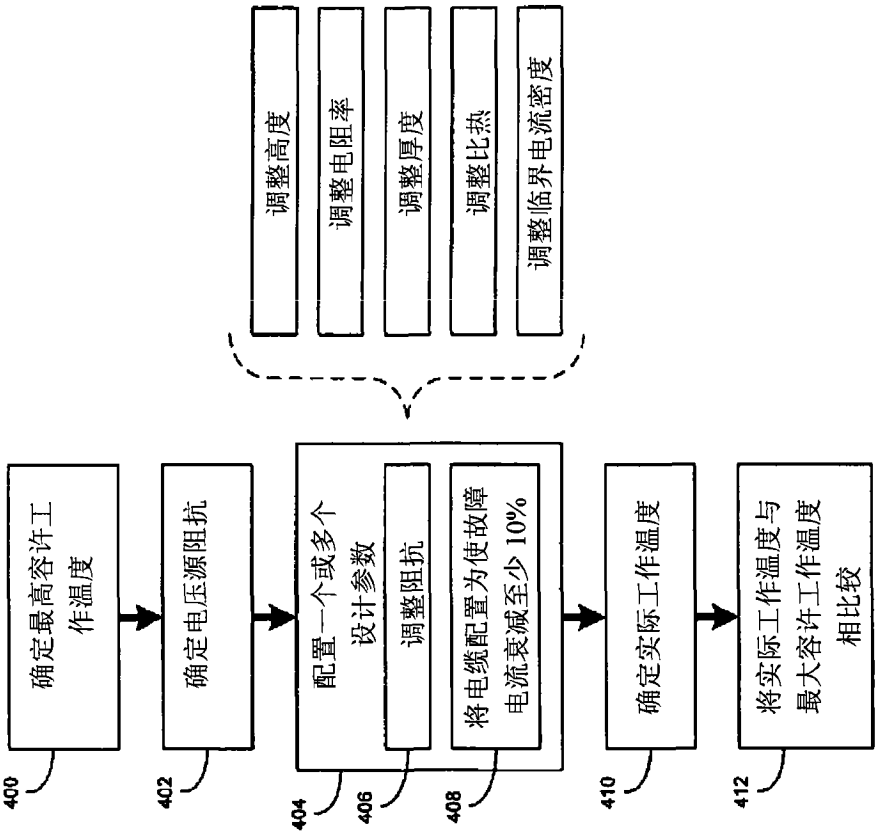

调整高度
调整电阻率
调整厚度
调整比热
调整临界电流密度
确定最高容许工作温度
确定电压源阻抗
配置一个或多个设计参数
调整阻抗
将电缆配置为使故障电流衰减至少 10%
确定实际工作温度
将实际工作温度与最大容许工作温度相比较
400
402
404
406
408
410
412

图 8