



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102449870 A

(43) 申请公布日 2012. 05. 09

(21) 申请号 200980158652. 5

H02H 7/28 (2006. 01)

(22) 申请日 2009. 04. 06

H02H 7/26 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2011. 10. 08

(86) PCT申请的申请数据

PCT/EP2009/054098 2009. 04. 06

(87) PCT申请的公布数据

W02010/115452 EN 2010. 10. 14

(71) 申请人 ABB 技术有限公司

地址 瑞士苏黎世

(72) 发明人 拉尔斯 - 埃里克 · 尤林

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

代理人 杜诚 贾萌

(51) Int. Cl.

H02J 3/36 (2006. 01)

H02M 7/757 (2006. 01)

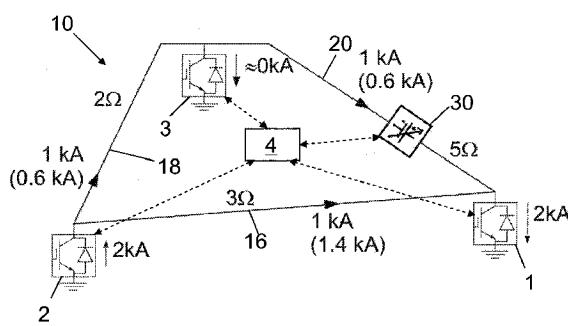
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 6 页

(54) 发明名称

网状高压直流输电网络中的电力潮流控制

(57) 摘要

一种网状 HVDC 输电网络 (10)，包括通过至少三个传输线路 (16, 18, 20) 互连在第一闭合路径中的至少三个 HVDC 换流站 (1, 2, 3)。第一 DC 电力潮流控制设备 (30) 串联连接到至少三个传输线路中的第一传输线路 (20) 中。所述第一 DC 电力潮流控制设备 (30) 从第一传输线路 (20) 获取该第一 DC 电力潮流控制设备 (30) 自身的电力并平衡所述第一闭合路径中的 DC 电流分布。



1. 一种对网状 HVDC 输电网络 (10) 中的电力潮流进行控制的方法, 所述网状 HVDC 输电网络 (10) 包括通过至少三个传输线路 (16, 18, 20) 互连在第一闭合路径中的至少三个 HVDC 换流站 (1, 2, 3), 其特征在于, 串联连接到所述至少三个传输线路中的第一传输线路 (20) 的第一直流电力潮流控制设备 (30) 由所述第一传输线路 (20) 供电, 并且对所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 进行控制, 使得所述第一闭合路径中的直流电流分布得到平衡。

2. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 确定所述至少三个传输线路 (16, 18, 20) 中的一个传输线路中的直流电流水平是否超过该传输线路的直流电流限制, 如果超过, 则启动所述第一直流电力潮流控制设备 (30), 以将附加的直流电压注入到所述第一传输线路 (20) 中, 使得所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平适当地增加或降低。

3. 根据权利要求 2 所述的方法, 其中, 在所述第一传输线路 (20) 的直流电流水平超过其直流电流限制的情况下, 对所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 进行控制, 以将附加的直流电压注入到所述第一传输线路 (20) 中, 以降低所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平。

4. 根据权利要求 3 所述的方法, 其中, 仅在所述至少三个传输线路中形成与所述第一传输线路 (20) 所属的连接并联的连接的其它传输线路 (16) 中的直流电流水平在它们的直流电流限制以下的情况下, 所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平才被降低。

5. 根据权利要求 2 所述的方法, 其中, 在属于与所述第一传输线路 (20) 所属的所述连接相并联的连接的一个其它传输线路 (16) 的直流电流水平超过其直流电流限制的情况下, 对所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 进行控制, 以将附加的直流电压注入到所述第一传输线路 (20) 中, 从而增加所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平。

6. 根据权利要求 5 所述的方法, 其中, 仅在所述第一传输线路 (20) 所属的所述连接的所述传输线路 (18, 20) 中的直流电流水平在它们的直流电流限制以下的情况下, 所述其它传输线路 (16) 的直流电流水平才被降低。

7. 根据上述权利要求中任一项所述的方法, 所述方法应用到包括多于三个 HVDC 换流站并且包括第二闭合路径 (8) 的 HVDC 网络, 其中, 所述方法包括附加的步骤:

- 给第二直流电力潮流控制设备 (24) 供应电力, 所述第二直流电力潮流控制设备 (24) 串联连接到属于所述第二闭合路径 (8) 的第二传输线路 (29), 其中所述电力是从所述第二传输线路 (29) 分接出的, 以及

- 对所述第二直流电力潮流控制设备 (24) 进行控制, 使得所述第二闭合路径 (8) 中的直流电流分布得到平衡。

8. 一种网状 HVDC 输电网络 (10), 包括通过至少三个传输线路 (16, 18, 20) 互连在第一闭合路径中的至少三个 HVDC 换流站 (1, 2, 3), 其特征在于, 第一直流电力潮流控制设备 (30) 串联连接到所述至少三个传输线路中的第一传输线路 (20), 并且所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 从所述第一传输线路 (20) 获取所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 自身的电力并且平衡所述第一闭合路径中的直流电流分布。

9. 根据权利要求 8 所述的网络, 包括中央控制单元 (4), 所述中央控制单元 (4) 适于检测在所述至少三个传输线路 (16, 18, 20) 中的一个传输线路中的直流电流水平是否超过了其电流限制, 如果超过, 则所述中央控制单元 (4) 向所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 发出电流控制信号, 从而启动所述第一直流电力潮流控制设备 (30), 以将附加的直流电压

注入到所述第一传输线路 (20) 中,由此分别增加或降低所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平,使得所述传输线路中的超过所述传输线路自身的直流电流限制的直流电流水平被降低。

10. 根据权利要求 8 或 9 所述的网络,其中,所述网络包括多于三个 HVDC 换流站以及第二闭合路径 (8),并且其中,第二直流电力潮流控制设备 (24) 串联连接到属于所述第二闭合路径 (8) 的第二传输线路 (29),其中,所述第二直流电力潮流控制设备 (24) 从第二传输线路 (29) 获取所述第二直流电力潮流控制设备 (24) 自身的电力并且平衡所述第二闭合路径 (8) 中的直流电流分布。

11. 根据权利要求 8 至 10 中任一项所述的网络,其中,所述 HVDC 换流站各自包括电压源换流器。

12. 一种直流电力潮流控制设备 (30),所述直流电力潮流控制设备 (30) 被布置为连接到网状 HVDC 输电网络 (10) 的至少三个传输线路 (16, 18, 20) 中的第一传输线路 (20),所述网络包括通过所述至少三个传输线路 (16, 18, 20) 互连在第一闭合路径中的至少三个 HVDC 换流站 (1, 2, 3),其特征在于,所述直流电力潮流控制设备 (30) 被布置成串联连接到所述第一传输线路 (20)、由所述第一传输线路 (20) 供应电力并且平衡所述第一闭合路径中的直流电流分布。

13. 一种直流电力潮流控制设备 (30),所述直流电力潮流控制设备 (30) 在所述至少三个传输线路 (16, 18, 20) 中的一个传输线路中的直流电流水平超过其直流电流限制的情况下将附加的直流电压注入到所述第一传输线路 (20) 中,由此适当地增加或降低所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平。

14. 根据权利要求 13 所述的直流电力潮流控制设备,其中,所述直流电力潮流控制设备 (30) 在所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平超过所述第一传输线路 (20) 自身的直流电流限制的情况下将附加的直流电压注入到所述第一传输线路 (20) 中,从而降低所述第一传输线路 (20) 中的直流电流水平。

15. 根据权利要求 13 所述的直流电力潮流控制设备,其中,在属于与所述第一传输线路 (20) 所属的所述连接相并联的连接的一个其它传输线路 (16) 的直流电流水平超过其直流电流限制的情况下,所述第一直流电力潮流控制设备 (30) 将附加的直流电压注入到所述第一传输线路 (20) 中,从而增加所述第一传输线路中的直流电流水平。

16. 根据权利要求 13 至 15 中任一项所述的直流电力潮流控制设备,其中,所述设备包括与所述第一传输线路 (20) 串联连接的第一换流器 (32) 以及与所述第一传输线路 (20) 分流连接的第二换流器 (34)。

17. 根据权利要求 16 所述的直流电力潮流控制设备,其中,所述第二换流器 (34) 用作为逆变器以将来自所述第一传输线路 (20) 的直流电力转换成为交流电力以供给所述第一换流器 (32),并且其中,所述第一换流器 (32) 用作为整流器,以提供要被注入到所述一个传输线路 (20) 中的附加的正或负直流电压。

18. 根据权利要求 16 或 17 所述的直流电力潮流控制设备,其中,所述第一换流器 (32) 被布置成使所述第一换流器 (32) 自身的换流器电流的方向反向。

## 网状高压直流输电网络中的电力潮流控制

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种网状 HVDC 输电网络,包括通过至少三条传输线路互连在第一闭合路径中的至少三个 HVDC 换流站 (converter station)。本发明还涉及一种在这种网络中控制电力潮流 (power flow) 的方法以及一种 DC 电力潮流控制设备,该 DC 电力潮流控制设备被布置成连接到该网络中的传输线路之一。

### 背景技术

[0002] 在现有技术中,通常已知的是 :HVDC 输电是以点对点互连的方式经由双端 HVDC 链路实现的。这种双端 HVDC 链路是包括有两个电力换流站的 HVDC 传输系统,在输电线路的每个末端处各有一个电力换流站。输电线路通常是单极线路或双极线路,该双极线路分别包括有位于几百千伏直至上千千伏的高 DC 电压处的第一极以及连接到地或连接到相反极性的高 DC 电压用于返回电流的第二极。实际上也存在有少数几个所谓的多端 HVDC 输电系统或网络,这些输电系统或网络包括有不止两个换流站和不止一条传输线路。良好的示例是在加拿大的魁北克和美国的新英格兰之间的 HVDC 传输网络,其具有世界上第一大規模的多端 HVDC 传输网络。该网络现今包括以串联的方式经由两条输电线路互连的三个换流站并且覆盖了 1480 千米的线路距离。换流站的线性互连还可以被称为非网状网络,以与包括有闭合路径的网状网络以及包括有闭合路径以及线性互连的部分网状网络形成对比。

[0003] 在未来,预期要建造更多以及一定程度上甚至更大的 HVDC 传输网络,这些 HVDC 传输网络可以适用于覆盖更长的距离和 / 或更大的面积并且可以用于例如在不同的陆地之间传送电力。这种大型 HVDC 传输网络可以是从零开始建造的,但也可以是在现有较小的 HVDC 传输网络之间新添加链路的结果。例如,由 Mata Prasad 等人在 1999 年 9 月在马来西亚的吉隆坡举办的 Cigré 研讨会上提交的“Viability of a national HVDC Transmission Ring in India”中,建议了可以在所谓的 HVDC 环方案中将印度现有的和未来的 HVDC 传输网络以及背对背式 (back-to-back) HVDC 链路集成起来,这实际上将形成包括有闭合路径和线性互连的部分网状 HVDC 网络。文章中指出 :对这种扩大的 HVDC 传输网络的实施和操作需要结合所需的控制算法的分层公式考虑具体问题,诸如构成网络的 HVDC 链路之间的协调,确保网络的各个区域的线路中最佳的电力潮流,并且以区域化的方式稳定网格。

[0004] 涉及多端 HVDC 网络的其它文档重点主要集中在网络的稳定性和可用性上,特别是在线路故障的情况下,诸如在由 Michael Häusler 在 1999 年 3 月在波兰的波兹南举办的 Central European Power Exhibition and Conference (CEPEX) 上提交的“Multiterminal HVDC for High Power Transmission in Europe”中,或者诸如在由 Victor F. Lescalle 等人在 2008 年 10 月 12 至 15 日在印度新德里举办的 IEEE Power India Conference (POWERCON) 上提交的“Challenges with Multi-Terminal UHVDC Transmissions”中。

[0005] 目前为止,在现有技术中还没有对网状 HVDC 网络在无故障工作条件下的工作进行过讨论。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的是提出一种可以在宽范围的负载条件下确保网状 HVDC 网络的工作的方案。

[0007] 该目的是由根据权利要求 1 所述的一种在网状 HVDC 输电网络中控制电力潮流的方法、根据权利要求 7 所述的网络和根据权利要求 9 所述的 DC 电力潮流控制设备所实现的。

[0008] 本发明基于对下述事实的认识：在具有至少一个闭合路径的网状 HVDC 网络中，可以对电力潮流的至少两种可能的路线的可用性加以利用，从而缓解那些对非常大的电流或者甚至接近于触发过流保护功能和 / 或设备的电流进行输送的传输线路。根据本发明，在包括有通过至少三条传输线路互连在第一闭合路径中的至少三个 HVDC 换流站的网状 HVDC 输电网络中的电力潮流是通过如下而被控制的：将电力供应到下述第一 DC 电力潮流控制设备，该第一 DC 电力潮流控制设备是串联连接到至少三条传输线路中的第一传输线路中的，其中，电力是从该第一传输线路分接出的；对第一 DC 电力潮流控制设备进行控制以平衡第一闭合路径中的 DC 电流分布。通过平衡电力潮流，即通过使经由并联连接的电流改道来在网状 HVDC 网络中尽可能均匀地分配电流潮流，使得缓解了重负载线路、最优地使用了网络的输电容量、降低了损失并且避免了过流保护设备的不必要的干预。此外，并不总是被过流保护设备保护的架空线路可以避免不再引起由于高电流潮流导致的架空线路的长度增加所引起的接地故障。如在世界各地所发生的几个情况中，重负载过流传输线路会增加线路的长度，这是因为所生成的热到了如此程度以使得重负载过流传输线路显著地下陷并会与接地物体例如在它们下面生长的植物进行物理接触。因而发生的接地故障可以是发展成更大范围的停电的起点。如果在对电流潮流进行重新分配时将传输线路的热容量考虑进去，那么这种情况就可以由于本发明而避免。

[0009] 优选地，假设网状 HVDC 输电网络是由中央控制单元控制的。该网状 HVDC 输电网络可以是独立的网络或者子网络，子网络是更大的 HVDC 输电网络的一部分或者是包括有一个或几个 AC 输电网络的混合式输电网络的一部分。据此，无论是独立的网络还是自网络，中央控制单元都可以独立地控制网状 HVDC 网络、或者可以对更大的 HVDC 网络的或者混合式网络的一部分进行控制、或者可以对整个更大的 HVDC 网络或者整个混合式网络进行控制。中央控制单元的任务之一是确保作为受控网络的一部分以及特别是网状 HVDC 输电网络的一部分的传输线路中没有任何一条承载过流。

[0010] 在网状 HVDC 输电网络的第一实施例中，建议中央控制适于检测在至少三条传输线路中的一条传输线路中的 DC 电流水平是否超过了 DC 电流限制，如果超过了，则中央控制单元向第一 DC 电力潮流控制设备发送出电流控制信号，从而启动第一 DC 电力潮流控制设备，以将附加的 DC 电压注入到第一传输线路中，使得第一传输线路中的 DC 电流水平合适地增加或降低。电流控制信号优选地包括所期望的要被注入的附加的 DC 电压的幅度和符号，但是电流控制信号也可以只是针对第一传输线路的 DC 电流限制连同一些关于同一闭合路径中的其它的传输线路中的 DC 电流水平的状态的信息，将对所期望的要被注入的附加的 DC 电压的幅度和符号进行确定的任务留给第一 DC 电力潮流控制设备中的内部控制单元。

[0011] 在本发明的更具体的实施例中，在第一传输线路的 DC 电流水平超过该第一传输线路自身的 DC 电流限制的情况下，第一 DC 电力潮流控制设备被控制以将附加的 DC 电压注

入到第一传输线路中,从而降低第一传输线路中的 DC 电流水平。应该最好将 DC 电流限制选择为低于第一传输线路的热容量限制和 / 或低于会触发特定的过电流保护功能和 / 或设备的限制。附加的 DC 电压可以是正或负电压,这是因为取决于第一 DC 电力潮流控制设备与第一传输线路的端部的相对位置,正电压注入或者负电压注入都会导致使第一传输线路的两个端部之间的电压差降低,使得线路中的 DC 电流水平被降低。在对第一实施例的另外的发展中,仅当至少三条传输线路中的形成与第一传输线路并联连接的其它的传输线路中的 DC 电流水平是在各自的 DC 电流限制以下时才降低第一传输线路中的 DC 电流水平。据此,确保了并联连接的传输线路确实具有接收第一传输线路中的电流水平所降低了的电流差的能力。通过将电力从第一传输线路而不是从外部电源或者外部电力供应网络施加到第一 DC 电力潮流设备,第一 DC 电力潮流设备变得独立于任何附加的基础设施并且可以由此可以定位在从网络设计的观点来看是最好的地方,甚至是在远程的以及不可访问的位置处。

[0012] 在本发明的第二实施例中,在属于与第一传输线路相并联的连接的一条其它传输线路的 DC 电流水平超过了该一条其它传输线路自身的 DC 电流限制的情况下,对第一 DC 电力潮流控制设备进行控制以将附加的 DC 电压注入到第一传输线路中,从而使第一传输线路中的 DC 电流水平增加。同样,取决于第一 DC 电力潮流控制设备与第一传输线路的端部的相对位置,附加的 DC 电压可以是正的或者负的。与第一实施例相反,这时的目的不是降低两个端部之间的电压差而是增加电压差,以使得第一传输线路中的 DC 电流水平增加。与第一实施例一样,最好的是检查了第一传输线路是否确实具有接收来自并联连接的一些电流的能力,即仅当第一传输线路中的 DC 电流水平是在该第一传输线路自身的 DC 电流限制以下时才降低一条其它的传输线路的 DC 电流水平。一条其它的传输线路的 DC 电流水平的降低当然意味着串联连接在同一并联连接中的所有其它的传输线路的 DC 电流水平也是降低的。

[0013] 在本发明的另外的实施例中, HVDC 网络包括多于三个 HVDC 换流站,其中,一对 HVDC 换流站互连在第一闭合路径中而一对 HVDC 换流站互连在第二闭合路径中,以及其中,一个或者一些 HVDC 换流站可以既是第一闭合路径的一部分也是第二闭合路径的一部分。在这样的 HVDC 网络中,第二 DC 电力潮流控制设备可以串联连接到属于第二闭合路径的第二传输线路。根据本发明的另外的实施例,将电力供应到第二 DC 电力潮流控制设备,其中,电力是从所述第二传输线路分接出的,而对第二 DC 电力潮流控制设备进行控制以使得第二闭合路径中的 DC 电流分布保持平衡。据此,通过策略性地将 DC 电力潮流控制设备放置在各个闭合路径中,以使得整个网络中的电流分布可以被平衡并被优化,并且由此可以最优化地使用网络的输电能力,即使在非常大并且密集互连的网状 HVDC 网络中对电力潮流进行控制也成为了可能。

[0014] 根据网状 HVDC 输电网络的具体实施例,网络的换流站各自包括电压源换流器(VSC)。如今处在工作中的多端 HVDC 方案全部都利用了传统的具有电网换向换流器(LCC, line commutated converter) 的传统 HVDC 技术。然而越来越多的基于 VSD- 技术的双端 HVDC 链路被引入到了市场上,如由 Agelidis 等人在 2006 年 9 月 23 至 26 日在中国西安举办的 the National Power Electronics Conference of China 上提交的“Recent Advances in High-Voltage Direct-Current Power Transmission Systems” 中所描述的。因为电

压源换流器用独立于实际电力潮流方向的同一电压极性来工作,该技术非常适合用于多端 HVDC 输电网络并由此适用于网状 HVDC 输电网络,这是因为网络中的电力潮流沿着两个方向都可以发生变化而无需开关动作。

## 附图说明

[0015] 对本领域技术人员而言,根据以下结合附图的详细说明,本发明的其它特征和优点以及另外的实施例将变得更加明显,在附图中:

- [0016] 图 1 示出根据本发明的包括有第一闭合路径的网状 HVDC 输电网络;
- [0017] 图 2 示出包括有第一闭合路径和第二闭合路径的网状 HVDC 输电网络;
- [0018] 图 3 示出用于单极传输线路的 DC 电力潮流控制设备的第一实施例;
- [0019] 图 4 详细地示出图 3 的 DC 电力潮流控制设备的第一换流器;
- [0020] 图 5 详细地示出图 3 的 DC 电力潮流控制设备的第二换流器;
- [0021] 图 6 示出用于双极传输线路的 DC 电力潮流控制设备的第一实施例;
- [0022] 图 7 示出对多端 HVDC 输电网络中的电压降进行补偿的方法的步骤;
- [0023] 图 8 示出用于单极传输线路的 DC 电力潮流控制设备的第二实施例;
- [0024] 图 9 示出用于单极传输线路的 DC 电力潮流控制设备的第三实施例;
- [0025] 图 10 示出用于单极传输线路的 DC 电力潮流控制设备的第四实施例。

## 具体实施方式

[0026] 图 1 示出一个闭合路径形式的网状 HVDC 输电网络 10,其也称为第一闭合路径,该网状 HVDC 输电网络 10 分别经由传输线路 16、18 和 20 将三个 HVDC 换流站 1、2 和 3 互连。电力潮流直接从换流站 2 到换流站 1 和换流站 3 并从换流站 3 到换流站 1,如由用于电流方向的箭头所指示的。在换流站 1 和换流站 3 之间,DC 电力潮流控制设备 30 串联连接到传输线路 20,DC 电力潮流控制设备 30 具有这样的能力:其在第一闭合路径中调节电流分布,使得电流分布保持平衡,从而避免在三条传输线路中任意一条中的过流。DC 电力潮流控制设备 30 直接从传输线路 20 接收该 DC 电力潮流控制设备 30 自身的电力。中央控制单元 4 对 HVDC 输电网 10 的工作进行控制,并因此与换流站 1、2 和 3 通信以及与 DC 电力潮流控制设备 30 通信,如虚线双箭头所指示的。

[0027] 图 7 中示意性地描绘了一种控制网状 HVDC 输电网络的方法。该方法是通过控制单元来执行的,该控制单元可以是集成在 DC 电力潮流控制设备中的控制单元或者可以是监测和监视 HVDC 网络的中央控制单元。在第一步骤 54 中,确定了 HVDC 网络中的至少一条线路的电流水平,其中该至少一条线路是已知或预期在可能超过可接受的电流水平方面是关键的线路。在第二步骤 56 中,决定所确定的电流水平是否超过 DC 电流限制。该 DC 电流限制是这样的电流限制:其指示了线路上的高电流水平,但是是在线路的热容量限制以下和 / 或在触发过流保护功能和 / 或设备的电流限制以下。对网络中的每条传输线路来说,取决于各个线路特性,电流限制值可以不同。如果第一步骤 54 中所确定的电流水平不超过限制,那么该方法返回到步骤 54 并且继续对电流水平进行监测。如果电流水平超过了限制,那么在第三步骤 58 中检查网络中是否存在可以拿走一部分电流的并联连接,即是否存在到具有过流水平的线路、具有一些剩余的电流容量的并联连接或并联电流路径。这可以

例如通过对将并联连接中的传输线路的电流水平与其各自电流限制进行比较来确定。如果没有找到任何具有剩余电流容量的并联连接,那么该方法返回到步骤 54,否则,将电力供应到与 DC 电力潮流控制设备串联连接的至少一个并联连接,这是在第四步骤 60 中执行的。在第五步骤 62 中,对至少一个 DC 电力潮流控制设备进行控制以将附加的 DC 电压注入到 HVDC 网络中,其中对附加电压的幅度和符号进行了选择,使得在 DC 电力潮流控制设备所连接到的传输线路上的电压差降低以降低该线路上的电流水平或增加以增加该线路上的电流水平,其中电流水平仅减少了可以由并联连接所拿走的幅度。

[0028] 在图 1 的示例中,全部三条线路 16、18 和 20 的电流水平被确定。在示例中,假设最初电流分布很不平衡,这由括号中示出的电流水平所指示。可以看出,在 HVDC 网络 10 中存在两个并联连接,其中电流可以从换流站 2 流到换流站 1。在由传输线路 18 和传输线路 20 形成的第一连接上,电流水平原先仅是 0.6kA,而在由传输线路 16 形成的第二并联连接上,电流水平原先仅是 1.4kA。假设所有三条传输线路 16、18 和 20 的电流限制均设定为 1.1kA。据此,在步骤 56 中,识别出了在传输线路 16 上的电流水平太高。因此,在步骤 58 中检查并联连接是否具有一些剩余的电流容量,即传输线路 18 和传输线路 20 上的电流水平是否是在其电流限制以下并且其低于该限制多少。因为在传输线路 18 和 20 上剩余有足够的电流容量,如自线路电流限制和线路电流水平之间的 0.5kA 的差所实现,因此从传输线路 20 对 DC 电力潮流控制设备 30 供应电力并进行控制将附加的正电压注入到传输线路 20 中,使得换流站 3 和换流站 1 之间的电压差增加。因此,增加了流过传输线路 20 的以及流过被串联连接在同一电流路径中的所有其它传输线路即这里的传输线路 18 的电流。附加的 DC 电压需是正电压,这是因为 DC 电力潮流控制设备 30 是沿着线路 18 以及线路 20 中的电流流向被定向的,并且线路中的电流应该被增加。可以在图 1 中根据描绘在电压源设备 30 的符号上的四象限图中的加号和减号看出 DC 电力潮流控制设备 30 的定向,该图指示正电压从较高的左边注入到较低的右边,即沿着与图 1 中电流在传输线路 20 上流动的方向相同的方向。

[0029] 该定向指示了表示在正的附加 DC 电压的情况下由 DC 电力潮流控制设备 30 生成并注入的电压的极性。在相反的情况下,如果需要降低传输线路 18 和传输线路 20 中的电流,那么需要来降低传输线路 20 上的电流的附加的 DC 电压会是负电压。如图 1 所示,传输线路 16 和传输线路 18 上的电流水平增加了 0.4kA,使得结果 1kA 流过所有三条传输线路,即 HVDC 网络 10 上的电流分布变得均匀地平衡。

[0030] 在图 2 中,示出不同于图 1 的另一种可能的 HVDC 网络拓扑的示例,从而示出如何在多于一个的闭合路径中布置多个 DC 电力潮流控制设备以平衡网络中的电流分布。该网络包括两个闭合路径 7 和 8,每个闭合路径分别包括四个换流站 9、11、13、15 以及 19、21、23、25。两个闭合路径 7 和 8 经由换流站 13 和换流站 23 之间的线性互联而互联,换流站 13 和换流站 23 之间有另外的换流器。在第一闭合路径 7 中,第一 DC 电力潮流控制设备 22 串联连接到换流站 13 和换流站 15 之间的传输线路 27,以便平衡第一闭合路径 7 中的电流分布。在第二闭合路径 8 中,第二 DC 电力潮流控制设备 24 串联连接到换流站 21 和换流站 23 之间的传输线路 29,以便平衡第二闭合路径 8 中的电流分布。通过以协同的 (coordinated) 方式控制第一 DC 电力潮流控制设备 22 和第二 DC 电力潮流控制设备 24,不仅可以在闭合路经内部调整电流水平,还可以在线性互联中,即在将换流站 13 和换流站 23 互联起来的传输线路上调整电流水平。两个 DC 电力潮流控制设备 22 和 24 均直接从它们所连接到的传输

线路上电力馈电。

[0031] 用以下所描述的各种实施例来解释可以如何实现这种线馈送 DC 电力潮流控制设备。

[0032] 在图 3 中示意性地示出 DC 电力潮流控制设备 30 的第一实施例。DC 电力潮流控制设备 30 串联连接到传输线路 20 (参见图 1)，并被描绘为虚线框。更具体地，DC 电力潮流控制设备 30 连接到所谓的电压注入点 26 和电力分接点 (power tapping point) 28 之间的传输线路 20。传输线路 20 位于高 DC 电压水平处，这里是标称的 300kV，并且其在图 3 的示例中是单极传输线路。如双线所指示的，DC 电力潮流控制设备 30 安装在绝缘平台 35 上。该平台 35 优选地连接到与传输线路 20 的电压水平相同的电压水平，即连接到 300kV。

[0033] DC 电力潮流控制设备 30 包括第一换流器 32，这里第一换流器 32 是电网换向换流器 (LCC, line commutated converter)，如是例如根据在 Erich Uhlmann, "Power Transmission by Direct Current"，Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1975 中所描述的现有技术而已知的。第一换流器 32 用作为整流器以将 AC 电压变换成 DC 电压，而由此能够将 DC 电压注入到电力分接点 28 和电压注入点 26 之间的传输线路 20 上，即第一换流器 32 与线路串联并且定向为自电力分接点 28 到电压注入点 26。第一换流器 32 又包括第一变压器 42、第一组 43 电流阀以及第一电感器 L1。在该第一组 43 中的电流阀各自具有控制端子 31，并且被设置成相互串联且与电压注入点 26 和电力分接点 28 之间的传输线路 20 串联，其中这些阀直接连接到电力分接点 28 并且经由串联连接的第一电感器 L1 间接连接到电压注入点 26。电流阀具有与线路有关的定向，其允许电流在线路中沿着一个方向行进，同时阻止电流沿着相反的方向行进。此外，第一组 43 电流阀被划分成多个部分，其中一个第一部分被连接到第一变压器 42 的第一绕组或第一组相绕组，而第二部分被连接到第一变压器 42 的第二绕组或第二组相绕组，其中第一变压器 42 是三相三绕组变压器。在这里，每个部分提供要由第一换流器 32 注入到传输线路 20 中的电压的一部分。

[0034] 图 4 更详细地示出对第一换流器 32 的可能的实现方式。LCC 换流器的第一变压器 42 是三相三绕组变压器，其具有磁连接到第一组  $\Delta$  互连相绕组 (Delta-interconnected phase winding) W4、W5 和 W6 而且还磁连接到第二组 Y 互连相绕组 W7、W8 和 W9 的第三组相绕组 W1、W2 和 W3。第三组中的每个相绕组 W1、W2 和 W3 的第一端经由各自的开关 S1、S2 和 S3 连接到第二变压器 40 (参见图 2)，而这些绕组 W1、W2 和 W3 的第二端共同连接到平台上的局部地 (local ground)。

[0035] 第一换流器 32 的第一组 43 电流阀的第一部分包括 6 个这里为半导体闸流管 (thyristor) 形式的电流阀，其中第一电流阀 T1 和第二电流阀 T2 连接在与传输线路 20 串联的第一支路中，第三电流阀 T3 和第四电流阀 T4 连接在与传输线路 20 串联的第二支路中，且第五电流阀 T5 和第六电流阀 T6 连接在与传输线路 20 串联的第三支路中。由此，第一支路、第二支路和第三支路与传输线路 20 串联并且相互并联。第一组相绕组中的单相绕组 W4 的第一端被连接到第一支路中、第一电流阀 T1 和第二电流阀 T2 之间。同一相绕组 W4 的第二端被连接到另一个相绕组 W5 的第一端，其中该其它相绕组 W5 的第一端还被连接到第二支路、第三电流阀 T3 和第四电流阀 T4 之间。该其它相绕组 W5 的第二端被连接到第一组绕组中的最后的相绕组 W6 的第一端。该最后的相绕组 W6 的第一端还被连接到第三支路中、第五电流阀 T5 和第六电流阀 T6 之间，同时该最后的相绕组 W6 的第二端被连接到第一

组相绕组中的首先提到的相绕组 W4 的第一端,由此提供  $\Delta$  连接。

[0036] 第一换流器 32 的第一组 43 电流阀的第二部分具有相同的类型,并且设置成以与第一部分相同的方式与传输线路 20 串联,其中第一部分和第二部分被布置成相互串联在电力分接点 28 与第一电感器 L1 之间。由此,在第二部分中也有三条并联支路,每条支路各自具有两个电流阀:T7、T8,或者 T9、T10,或者 T11、T12。第二组绕组的每个相绕组 W7、W8 和 W9 的第一端连接在相对应支路的两个电流阀之间,而第二组绕组的相绕组 W7、W8 和 W9 的第二端相互连接,由此提供 Y 连接。

[0037] 再次参照图 3,DC 电力潮流控制设备 30 除了包括第一换流器 32 之外,还包括电流检测器 36,在本实施例中,电流检测器 36 连接到电力分接点 28,以便确定传输线路 20 中的 DC 电流的电流水平。电流检测器 36 又连接到控制单元 38。控制单元 38 是可以通过使用处理器和相关联的程序存储器来实现的,控制单元 38 确定需要注入到传输线路 20 中的所期望的 DC 电压,以便使由电流检测器 36 确定的电流水平降低或增加,并且计算要被施加到第一组 43 电流阀的相对应的控制信号。控制单元 38 对电流阀的控制端子 31 发出相对应的控制信号。这里,要被注入的电压典型地通过电流阀的相角合适的变化来实现。控制单元 38 还连接到第二换流器 34,以下解释该第二换流器 34 的结构和功能。

[0038] DC 电力潮流控制设备 30 包括第二换流器 34,该第二换流器 34 分流连接在传输线路 20 的电力分接点 28 和接地端子 33 之间,且也由控制单元 38 控制。由此,第二换流器 34 以与图 1 中的换流器 1 和换流器 3 相同的方式被设置在传输线路 20 和地之间。第二换流器 34 还连接到第二变压器 40,第二变压器 40 自身经由线路 37 连接到第一变压器 42 的第三绕组或第三组相绕组。

[0039] 图 3 的实施例中的第二换流器 34 是电压源换流器 (VSC) 34,其用作为逆变器,即电压源换流器 (VSC) 34 将输入 DC 电压转换为输出 AC 电压。这里,输入 DC 电压是电力分接点 28 处的电压,而输出 AC 电压是变压器 40 的输入电压,该输入电压被变换成为线路 37 上的期望的 AC 电压水平。因此,线路 37 可以被认为是布置在平台 35 上的局部 AC 网络,其被用作为第一换流器 32 的馈送网络并被用作为平台上的另外的设备的辅助电源,另外的设备诸如断路器,其中,这种另外的设备未在图中示出。

[0040] 在图 5 中示出第二换流器 34 的一种可能的实现方式,其中有两个串联连接的、这里为两个绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 形式的电流阀 44 和 46,每个电流阀 44 和 46 分别具有与其反并联 (anti-parallel) 连接的二极管 48 和二极管 50。电容器 52 与电流阀 44 和电流阀 46 二者并联连接,即电容器 52 连接在第一电流阀 44 的 IGBT 的集电极与第二电流阀 46 的 IGBT 的发射极之间。第二电感器 L2 连接在传输线路 20 上的电力分接点 28 与串联连接的电流阀之间。电流阀 44 和电流阀 46 之间的连接点连接到第三电感器 L3,第三电感器 L3 自身连接到图 2 的变压器 40。第一电感器 L1、第二电感器 L2 以及第三电感器 L3 指示对高频谐波进行滤波器的存在。

[0041] 在 HVDC 输电网络 10 是双极系统、第一极是传输线路 20 的情况下,DC 电力潮流控制设备 30 包括其用在单极情况下(参见图 3)的基本部件的重复 (duplicate),如图 6 所示。重复的基本部件是重复的第一换流器 32\*、重复的第二换流器 34\*、重复的第二变压器 40\* 以及重复的局部 AC 网络线路 37\*,它们以与原始部件连接到第一极的方式相同的方式相互连接并且连接到第二极 20\*。

[0042] 参照先前所描述的图 1 至图 5 以及图 7 来描述如何对本发明的 DC 电力潮流控制设备进行操作的示例。根据图 7 中的第一方法步骤 54 和第二方法步骤 56, 检测器 36 可以用于对传输线路 20 的 DC 电流水平进行连续地监视。所检测到的 DC 电流水平经由控制单元 38 转送到中央控制单元 4, 中央控制单元 4 然后确定是否需要将附加的 DC 电压注入到传输线路 20 中, 以及如果需要那么电压应该具有多大的幅度和哪一符号。所检测到的 DC 电流水平被发送至中央控制单元 4, 而由控制单元 38 从中央控制单元 4 经由中央控制单元 4 和控制单元 38 之间的双向通信线路来接收所谓的电流控制信号, 该双向通信线路在图 3 中被指示为块状双箭头。基于由电流检测器 36 检测到的电流水平以及基于另外的信息诸如针对传输线路 20 所限定的 DC 电流限制、DC 电力潮流控制设备 30 的方向和实际的 DC 电流水平, 以及与传输线路 20 在同一闭合路径中的其它传输线路的相对应的 DC 电流限制, 中央控制单元 4 执行确定是否需要注入附加的 DC 电压以及需要注入哪个附加 DC 电压的功能。如果传输线路 20 或者在同一闭合路径中的传输线路之一 (即传输线路 16 和传输线路 18) 的、所检测到的 DC 电流水平超过了其 DC 电流限制, 中央控制单元 4 决定需要将附加的 DC 电压注入到传输线路 20 中。在该情况下, 根据第三步骤 58, 中央控制单元 4 还确定在与具有超过其 DC 电流限制的电流水平的传输线路并联的连接中剩余电流容量是否足够拿走一些电流。如果不足够, 方法返回到步骤 54, 即不进行任何动作。

[0043] 在针对闭合路径中没有剩余电流容量的情况下的可替换方案中, 中央控制单元 4 可以决定降低属于闭合路径的所有传输线路 16、18 以及 20 中的电流。在这种情况下, 除了步骤 60 和 62 之外, 中央控制单元 4 会需要采取另外的措施, 诸如给换流站 1、2 和 3 发送出合适的控制信号, 要求这些换流站降低总电流。这里没对这些另外的措施进行描述。

[0044] 在并联连接中的电流容量足够的情况下, 取决于超过的 DC 电流水平以及其相对应的 DC 电流限制之间的差, 以及剩余电流容量的幅度和 DC 电力潮流控制设备 30 的方向, 所期望的要被注入的附加 DC 电压的幅度和符号由中央控制单元 4 计算, 并作为电流控制信号发送至控制单元 38。以这种方式, 根据步骤 60 和步骤 62, DC 电力潮流控制设备 30 被启动以开始经由第二换流器 34 从传输线路 20 分接电力, 并且开始经由第一换流器 32 将合适的电压注入到传输线路 20 中。

[0045] 为了将其实现, 取决于要被注入的附加的 DC 电压的期望的幅度和符号, 控制单元 38 计算其发送到第二换流器 34 的以及发送到第一换流器 32 的控制信号, 以便分别将它们启动以提供并且注入附加的 DC 电压到传输线路 20 中。然后由电力分接点 28 和电压注入点 26 之间的第一换流器 32 注入附加的 DC 电压。更具体地, 根据图 7 的第四步骤 60, 经由第二换流器 34 通过在电力分接点 28 处分接来自传输线路 20 的 DC 电力来执行对附加的 DC 电压的提供。然后, 所分接的 DC 电力被通过第二换流器 34 和第二变压器 40 转换成中间的 AC 电力, 该中间的 AC 电力又由第一变压器 42 转换, 从而将合适的 AC 电压施加到第一换流器 32。然后, 通过第一换流器 32 的第一组 43 电流阀的合适的开关来执行将附加的 DC 电压注入到传输线路 20 中, 使得 AC 电压被转换为 DC 电压, 并且使得 DC 电压的水平和极性被调整为由控制单元 38 计算出的所期望的附加 DC 电压的水平和极性。

[0046] 在可替换的方案中, 控制单元 38 装配有通信装置, 以与 HVDC 输电网络 10 中的其它设备进行通信, 还可能的是: 控制单元 38 自身独自执行全部步骤 54 至步骤 62, 或者这些步骤可以以其它方式例如以上所描述的方式在中央控制单元 4 和控制单元 38 之间或者甚

至是在另外的控制单元之间被分担。

[0047] 因为是通过分接来自电力线路自身的电力来提供用于调整电流水平所需的电力，所以不需要外部电源，这意味着可以将本发明的 DC 电力潮流控制设备设置在远程的以及不可访问的位置处。

[0048] 根据本发明的串联连接的 DC 电力潮流控制设备的设计可以以多种方式变化，现将对一些方式进行描述。

[0049] 图 8 示出 DC 电力潮流控制设备 30' 的第二实施例，而图 9 示出 DC 电力潮流控制设备 30" 的第三实施例，这两个实施例在大多部分具有与图 3 的 DC 电力潮流控制设备 30 相同的结构，并且这两个实施例被设计成对传输线路 20 上的反向电流进行处理。如图所示，这两个实施例的第一换流器 32' 和 32" 分别与图 3 的第一换流器 32 不同，而为了简单起见，在图 8 和图 9 中均未示出电流检测器 36 和控制单元 38，即使电流检测器 36 和控制单元 38 出现在 DC 电力潮流控制设备 30' 和 30" 二者中。

[0050] 在图 8 中，第一换流器 32' 包括第一组 43 电流阀和附加的第二组 43' 电流阀，这里，附加的第二组 43' 电流阀设置在以第一组中的方式相同方式包括有支路的各部分中。该第二组 43' 电流阀与第一组 43 反并联地连接。第二组 43' 还以与第一组 43 电流阀相同的方式连接到第一变压器 42，并且接收相同的控制信号。

[0051] 图 9 中的第一换流器 32" 提供了与图 8 中的第一换流器 32' 基本同一类型的功能，但是仅需要第一组 43 电流阀。这里，用于处理反向电流的布置包括一组被布置成使流过与传输线路 20 有关的第一组 43 中的电流阀的电流的方向发生反向 (reverse) 的开关 S4、S5、S6 以及 S7。开关 S4 和 S5 被放置成与传输线路 20 串联，开关 S4 在电力分接点 28 和第一组 43 电流阀之间，而开关 S5 在第一电感器 L1 和电压注入点 26 之间。开关 S6 被设置在这样的支路中：该支路从开关 S4 和第一组 43 电流阀之间的连接点伸出到电压注入点 26，而开关 S7 被设置在下述支路中：该支路从电力分接点 28 处伸出到开关 S5 和第一电感器 L1 之间的接触点。

[0052] 当电流在图 9 中从左向右行进时，开关 S4 和 S5 是闭合的而开关 S6 和开关 S7 是断开的。如果电流沿着相反的方向行进，那么开关 S4 和开关 S5 是断开的而开关 S6 和开关 S7 是闭合的。

[0053] 根据图 9 的第三实施例与根据图 3 的第一实施例更多的不同在于：电容器 41 与第二变压器 40 串联连接，从而滤除任何 DC 电压，使得第二变压器 40 经历 (see) 纯的 AC 电压。

[0054] 根据 DC 电力潮流控制设备的第四实施例，如图 10 所示，第二变压器 40 可以略去。在这种情况下，将另外的换流器即 DC-DC 换流器 64 用来调整电压水平。在该示例中，第二电感器 L2 被放置在第二换流器 34' 外部，并且在电力分接点 28 和 DC-DC 换流器 64 之间被分流连接到第二换流器 34'。第二换流器 34' 在所有其它方面都与图 3 中的第二换流器 34 相同。DC-DC 换流器 64 包括 IGBT 66，IGBT 66 的集电极连接到第二电感器 L2，发射极连接到地。二极管 68 反并联地连接到 IGBT 66。电容器 70 连接于伸展在电力分接点 28 与地之间的并联支路中。另外的电容器 72 被连接在 IGBT 66 的发射极和第二电感器 L2 之间。最后，另外的二极管 74 被连接在第二电感器 L2 和第二换流器 34' 的接地端子之间，并且被朝向该接地端子定向。DC-DC 换流器 64 将传输线路 20 的 DC 电压转换成适于由第二换流器

34' 输出的电压水平的低电平,因此第二换流器 34' 在其输出侧不需要第二变压器 40。

[0055] DC 电力潮流控制设备的另外的改变和实现是可能的。例如,可以使用其它类型的电流阀,诸如 MOSFET 晶体管、栅极可关断晶闸管 (GTO, Gate Turn-Off Thyristor) 以及汞弧阀。此外,设置在换流器中的部分和电流阀的数目可以改变,或者可以将换流器布置成多个子换流器的串联连接。此外,可以设置并联连接的旁路开关,只要不需要 DC 电力潮流控制设备该旁路开关就闭合。还应该认识到:可以使用各种保护措施,诸如谐波滤波器、断路器以及设备断开开关。除此之外,电流检测器和控制单元不必是 DC 电力潮流控制设备的整体部分,而是可以换作为被设置成一个或两个分离的设备。因此,在这种应用中,本发明是应用于 VSC HVDC 换流器的多端子方案中。然而,本发明同样可应用于具有传统 LCC HVDC 换流器的多端子方案中。

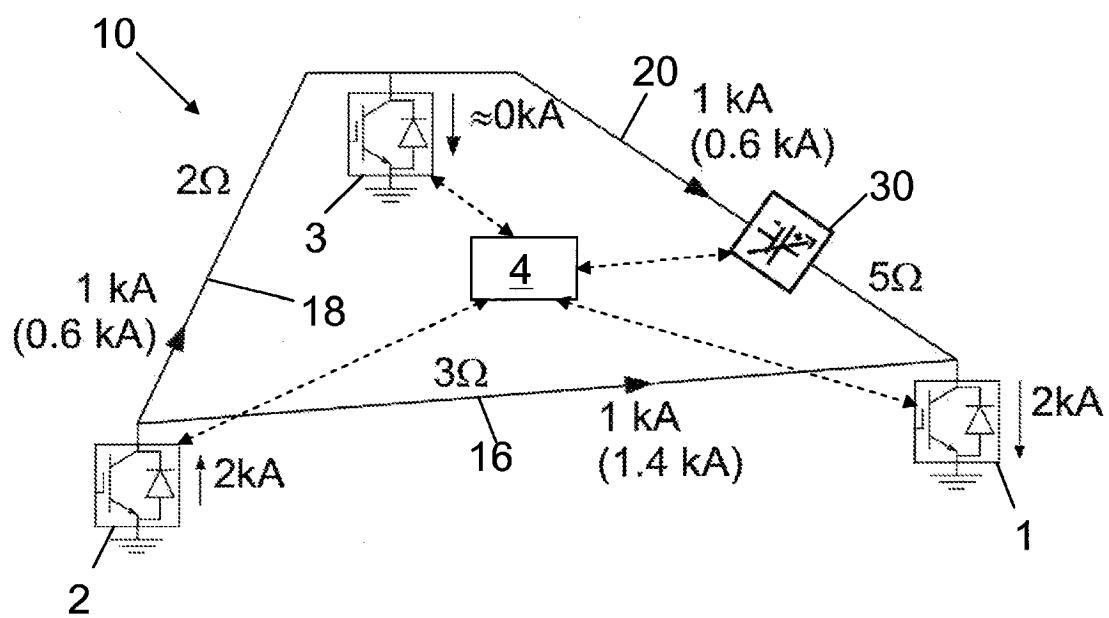


图 1

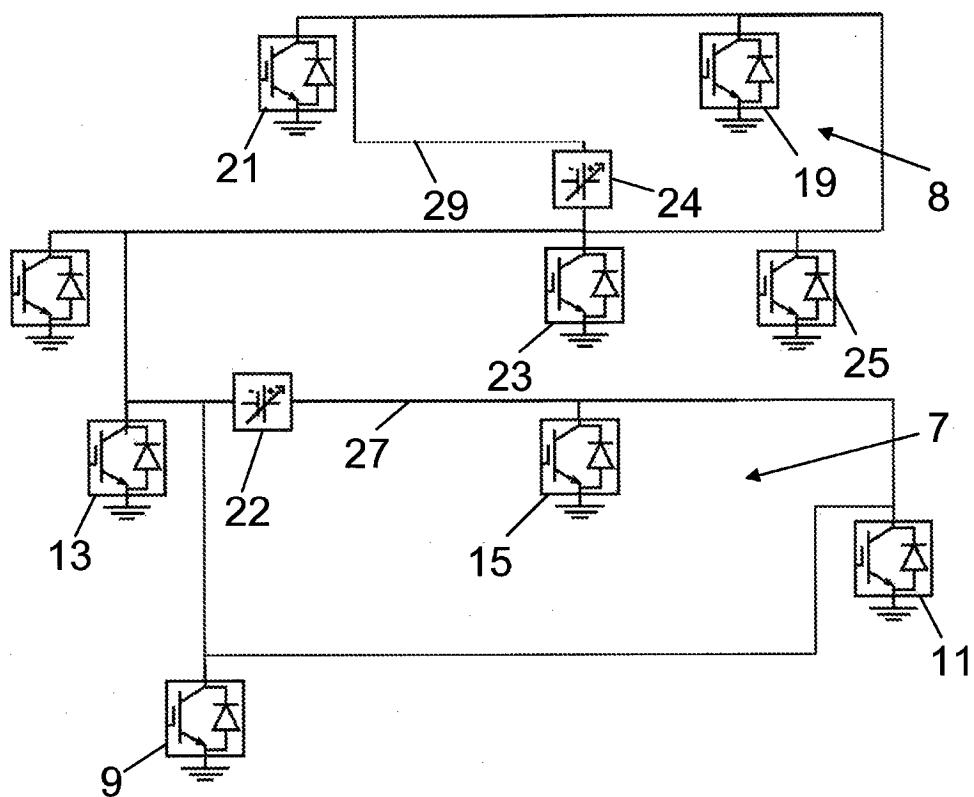


图 2

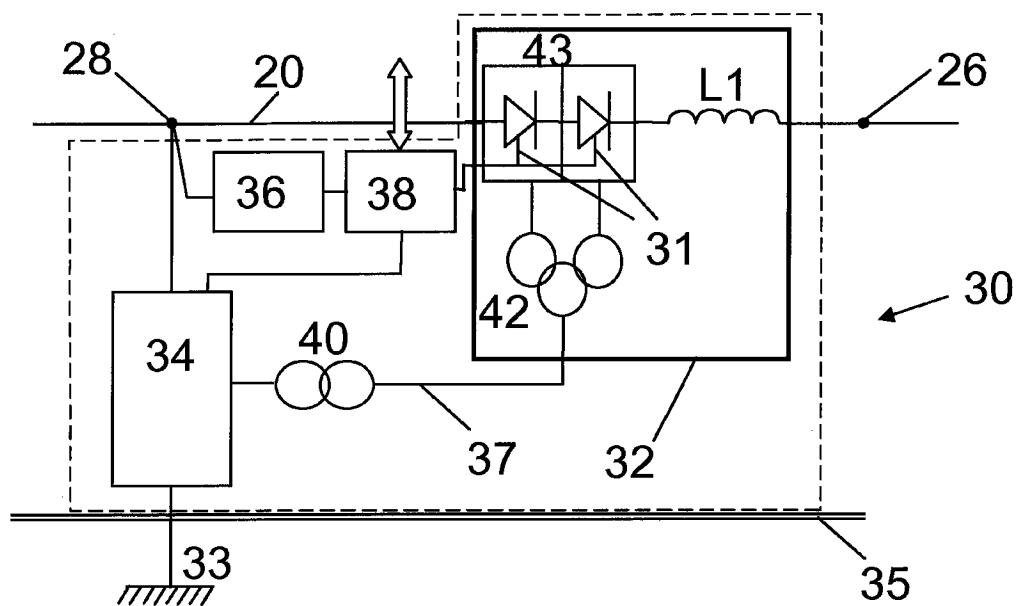


图 3

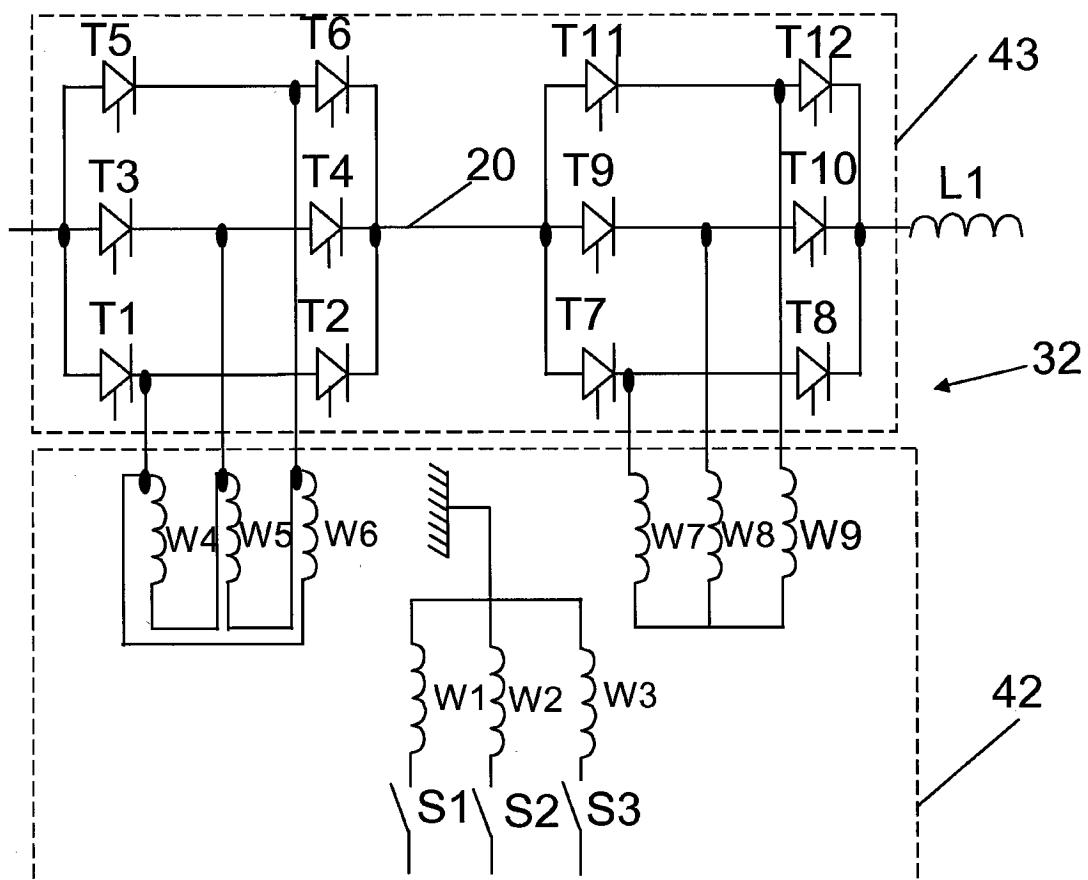


图 4

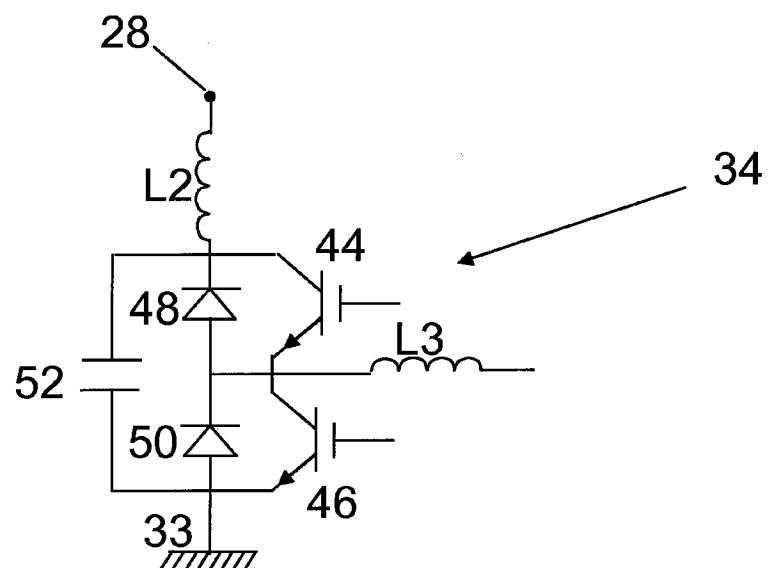


图 5

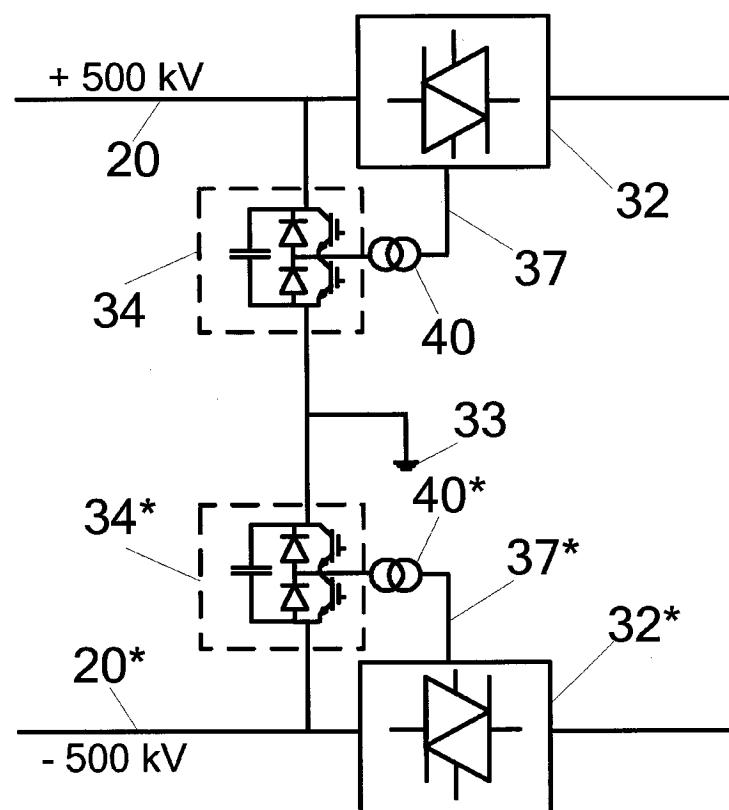


图 6

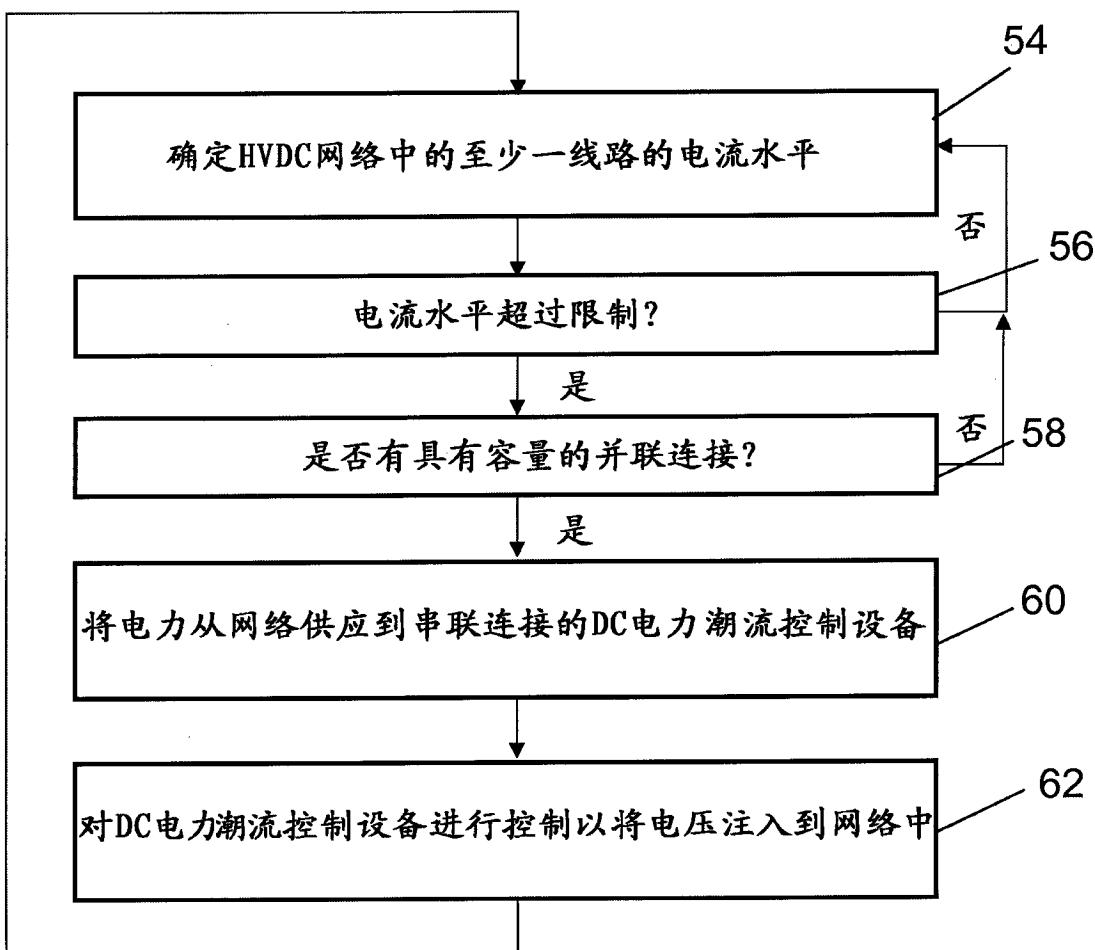


图 7

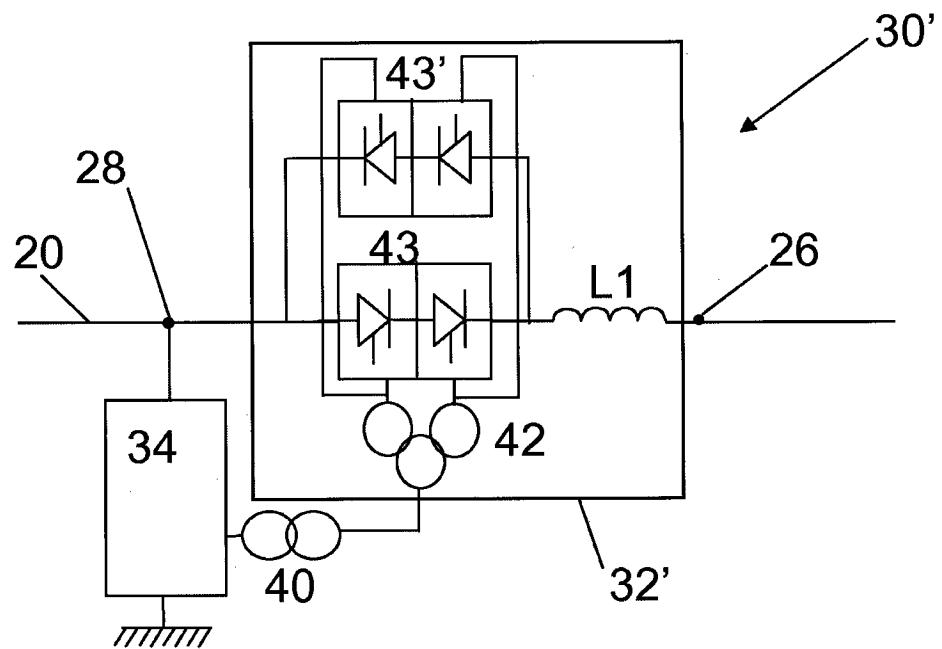


图 8

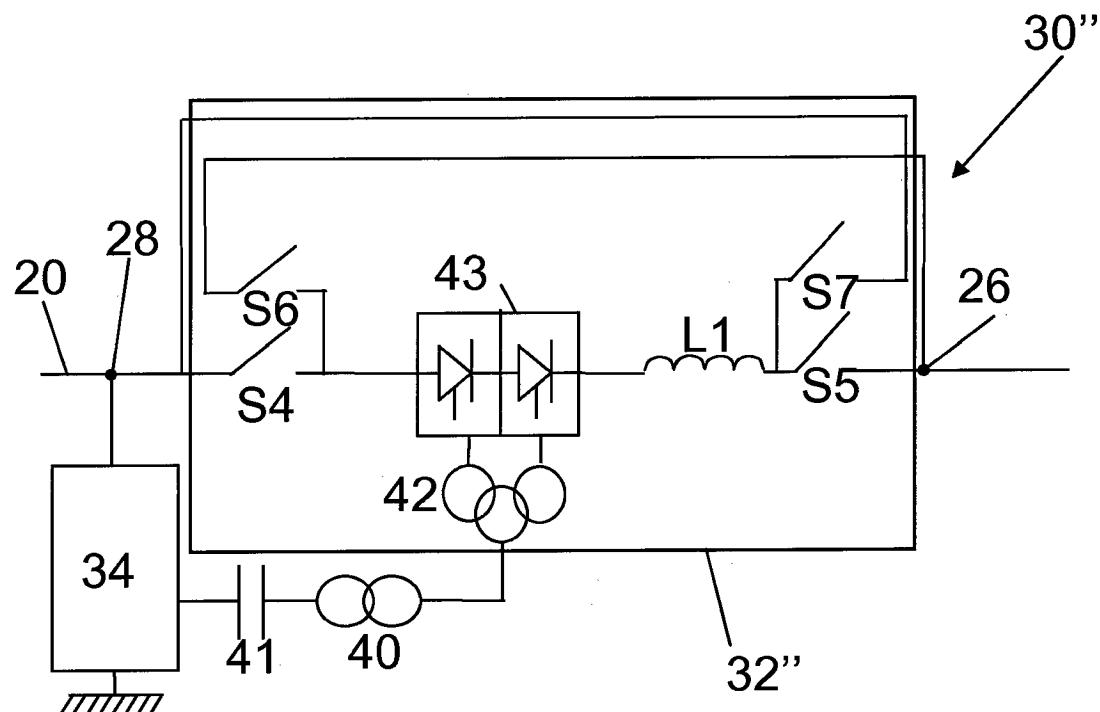


图 9

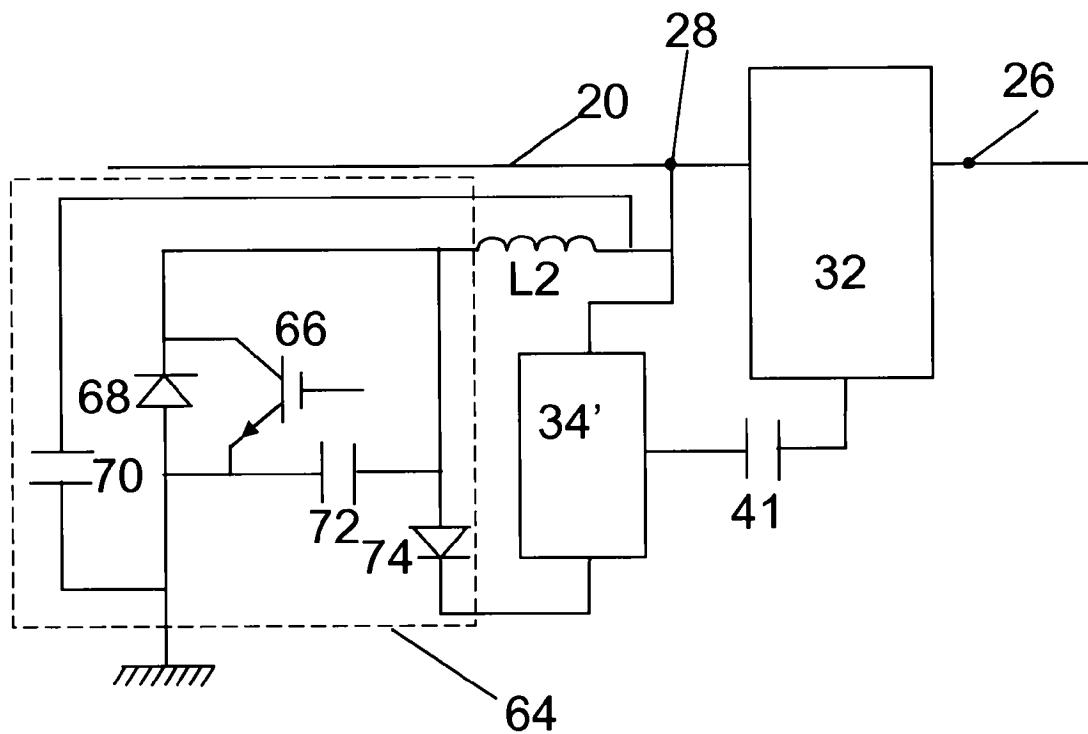


图 10