



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 106564408 A

(43) 申请公布日 2017.04.19

(21) 申请号 201510650986.1

(22) 申请日 2015.10.10

(71) 申请人 上海稳得新能源科技有限公司

地址 200433 上海市杨浦区营口路 825 号
605 室

(72) 发明人 於岳亮 於菲 瑞秋

(51) Int. Cl.

B60M 3/00(2006.01)

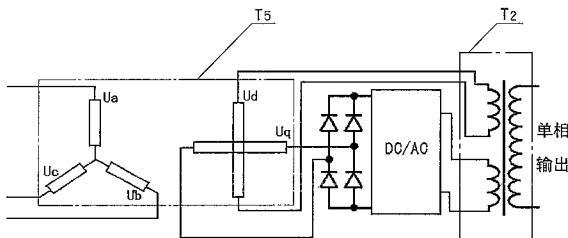
权利要求书1页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

电气化铁路无换相区同相牵引供电系统

(57) 摘要

本申请披露了如何将平衡三相电变换为同相电的装置，包括以电子设备和 / 或电机变压器构成的种种电气化铁路牵引供电装置。这些设备都具有高效节能、较低的成本，易于制造等优点，由电子设备处理的功率容量约占 46% 至 67%，就能将平衡三相电变换为单相电，还可以通过负序补偿和无功补偿获得更好的三相平衡和高功率因数，因此可以取消电气化铁路中的换相区，节约铁路建设投资，稳定列车供电，提高列车运行安全性。



1. 一种电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,由电网所供平衡三相交流电或直流电通过电子设备和 / 或电机电器换流为单相电输入列车牵引网;牵引供电网中无分相区。
2. 根据权利要求 1 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,变流器中的交 / 直变换器为虚拟六相整流器。
3. 根据权利要求 1 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,保留 a 相 ;b 和 c 相接二相整流器,整流器输出的直流再逆变为 a 相电 ; 两部分 a 相电分别接入合成变压器 T2 各自的初级绕组,次级绕组接牵引网。
4. 根据权利要求 1 或权利要求 3 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,二相整流器为倍压整流器。
5. 根据权利要求 1 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,取其中一相电压直送合成变压器 T2 的初级绕组 ; 合成变压器 T3 的次级绕组接合成变压器 T2 的第二个初级绕组 ; 合成变压器 T4 的次级绕组经整流逆变相位转换成与上列相同相位的交流电 ; 变流器输出接合成变压器 T2 的第三个初级绕组 ; T2 的次级绕组接到牵引网。
6. 根据权利要求 1 或权利要求 5 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,合成变压器 T3 和 T4 采用相电压分相或线电压分相的不同结构。
7. 根据权利要求 1 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,系统内有一台旋转磁场变压器 ; 由旋转磁场变压器将平衡三相电改变为平衡二相电 ; 由电子变流器实现同相化。
8. 根据权利要求 1 或权利要求 2 或权利要求 3 或权利要求 5 或权利要求 7 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,牵引变电所为全补偿、半补偿或不补偿。
9. 根据权利要求 1 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,牵引馈电的输入为直流电,尤其是由太阳能电站或风电网供给的直流电。
10. 根据权利要求 1 或权利要求 9 所述的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,牵引馈电的输入为高压直流电 ; 串联单元逆变器 (1) 由低压逆变器 DC/AC 和一个并联开关组成 ; 由若干个相同的单元逆变器串联后接入高压直流电网中。

电气化铁路无换相区同相牵引供电系统

发明领域

[0001] 本发明属于电技术领域中的电能传输技术,具体地说,涉及电气化铁路的三相平衡牵引供电。

背景技术

[0002] 电气化铁路是铁路牵引供能的重要手段。电气化铁路主要由交流大电网来供电,但目前的大电网是三相体制,要求三相电流相等,否则会产生负序电流和逆序磁场,影响电网内发电机和电动机的正常运行。而牵引网和集电弓很难将三相电引入列车,只能采用单相牵引网向列车输送电能,且列车的用电量巨大,很容易产生三相电不平衡。因此为了满足电网对三相电严苛的平衡要求,只能采用由不同相位的交流电分区向牵引网局部供电的异相供电,所以,造成了必须设置隔离供电区间的分相区,异相供电有以下缺点:

[0003] 1、在异相供电方式中,为求得对电力系统的平衡,牵引变压器所采取三相进线换相连接措施,这就导致了 27.5kV 侧接触网电分相(分相绝缘器)环节的出现。而高速和重载运输则要求机车受电弓平滑连续受流,因此,这种电分相由于机械、电气上的弱点,不仅成为速度和牵引力损失的主要原因,也是整个系统中最薄弱的环节之一。

[0004] 自动过分相装置虽然是解决问题的方法之一,但因电压高、转换动作频繁,使其准确性和可靠度在应用中受到严峻挑战。因此,过分相仍是电气化铁路牵引供电的一个技术瓶颈。

[0005] 2、高速、重载运输都需要大容量供电,为满足国家标准中电力系统对电气化铁道以负序为突出的电能质量的限制指标,原有异相供电方式所使用的无功补偿技术已无法适应。若在牵引变电所采用可调对称补偿,即使使用交直交机车牵引(不计其无功和谐波),技术和经济上也均难达到理想状态。

[0006] 3、我国将建设的高速铁路可能是高、中速混跑的模式,若出现交直交机车与交直机车混用局面,除负序外,无功和谐波仍然存在,电能质量不能改善,电气化铁路将面临高价电费问题。同时,速度和牵引力的损失可能使高、中速列车速度差进一步拉大,影响整体运输能力。

[0007] 4、此外,在电气化铁路建设过程中必须同时增加分相区建设,增加了建设成本;同时,在列车经过分相区时,列车供电受阻,可能处于失电状态,还有可能因此带来设备故障。

发明内容

[0008] 本发明的目的是通过电制变换将平衡三相电转变为单相电,由单相电向列车供电,全路都是同一相的电压,就可以克服异相供电的缺点,取消电气化铁路上的分相区。

[0009] 本发明的由电网供电的电气化铁路同相牵引馈电网,其特征是,由电网所供平衡三相交流电或直流电通过电子设备和 / 或电机电器换流为单相电输入列车牵引网;牵引供电网中无分相区。

[0010] 将平衡三相电转换为单相电,引入电气化铁路牵引网后,繁杂的分相区设置就可

以取消,可以节约铁路建设的成本,加速施工进度。同时,在线路中运行的列车也可避免中断供电的困扰,方便列车运行,提高安全性和运输效率。

附图说明

- [0011] 图 1、传统的基本型 3 相变 1 相变流器线路。
- [0012] 图 2、三相电的线电压损失原理图。
- [0013] 图 3、五相和七相电的向量和线电压示意图。
- [0014] 图 4、三相、四相和六相交流电压向量对照图。
- [0015] 图 5、通过倒相变压器将三相电变换为六相电的示意图。
- [0016] 图 6、本发明变流器中的虚拟六相整流器的原理线路图。
- [0017] 图 7、本发明的仅将三相电压中的 2 相电子逆变线路结构图。
- [0018] 图 8、三相向量电压分解示意图。
- [0019] 图 9、向量合成变压器 T3 和 T4 绕线方向简图。
- [0020] 图 10、采用三变压器的 3 相变 1 相原理线路图。
- [0021] 图 11、旋转磁场变压器的 3 相变 2 相简图。
- [0022] 图 12、本发明的采用旋转磁场变压器和电子变流器的 3 相变 1 相系统简图。
- [0023] 图 13、直流供电的电气化铁路的牵引网。

具体实施方式

[0024] 要将平衡的三相电改变为单相供电,最简单的传统方法是把平衡三相电全额整流为直流电,然后通过 DC/AC 逆变器,再将直流电全额变换为单相交流电。这一结构称为基本型 3 相变 1 相变流器线路。

[0025] 图 1 为传统的基本型 3 相变 1 相电子变流器线路。

[0026] DC/AC 逆变器有电压源逆变器和电流源逆变器之分,前者的效率较高、电压稳定性较好,后者的限流特性好、安全性高。

[0027] 图 1a) 为 DC/AC 电压源逆变器,直流回路中有并联电容器 C。图 1b) 为 DC/AC 电流源逆变器,直流回路中串联有电感 L。

[0028] 整流器和逆变器采用双向型,既可以将三相交流功率整流成直流电,当列车再生制动时,列车的动能转变为电能,由变流器将电能回馈到三相电网中。他们也可以以四象限运行,以满足负载对电网的功率因数的要求。

[0029] 本发明首先对 AC/DC 整流器进行改进。

[0030] 在对现有三相电网的研究探索和实验测试中,三相电在变换为直流电时的电压利用率不高的现象被本发明人所发现,该现象称为三相电的线电压损失。以下为对线电压损失的分析描述。

[0031] 在传统的三相整流器中,交流电常采用星形接法输入整流器。

[0032] 图 2 所示为传统的三相电星形接法向量及整流器线路图。为作图方便起见,整流管都画成单向导电的二极管,实际应用中可以采用开关管等可控器件。

[0033] 假设电网的相电压为 220V 的星形接法,由三根相线将电压接入桥式整流器的输入端。在该结构中,实际上利用的是交流电的线电压 380V。整流桥正是对 380V 的线电压进

行整流变换,才能获得直流电输出,所以其输出直流电压与 380V 的线电压正相关。

[0034] 图 3 为五相和七相电的向量和线电压示意图。

[0035] 从图 3 的奇数相数——五相和七相交流电压向量图中可以看出。同样的 220V 相电压,五相制交流电的最高线电压 418V,七相制交流电的最高线电压更高达 429V。从图上可以很直观方便地比较出它们在数量上与三相电的区别。

[0036] 3、5、7……等奇数相数交流电的最高线电压 U_{max} 的表达式为:

$$[0037] U_{max} = 2U\Phi \sin [360^\circ \times (N-1)/4N] \quad (\text{式 -1})$$

[0038] 式中 : $U\Phi$ 为交流电的相电压,

[0039] N 为交流电的相数。

[0040] 按 (式 -1) 可计算出三相、五相、七相交流电制中最高线电压分别为

$$[0041] U_{max3} = 381V,$$

$$[0042] U_{max5} = 418V,$$

$$[0043] U_{max7} = 429V.$$

[0044] 虽然五相或七相电制有多种线电压,但最高线电压只有一种。

[0045] 由于整流二极管的单向导通特征只允许最高电压导通,其它线电压基本上不起作用,所以整流器直流输出电压的幅值与最高线电压成正相关。这意味着,同样数值的相电压,相数越多的交流电制,其直流输出电压越高。

[0046] 图 4 所示为三相、四相和六相交流电压向量对照图。从图中看出,偶数相电制中的最高线电压 U_{max} 均为二倍相电压。

$$[0047] U_{max3} = 381V,$$

$$[0048] \text{而 } U_{max4} = U_{max6} = \dots = 440V$$

[0049] 根据实验和理论分析,各种相数电制下的交直流电压的比较如表 1 所示。

[0050] 表 1 各种相数电制下的交直流电压的比较表

[0051]

	三相电	四相电	五相电	六相电	七相电
相电压 $U\Phi(V)$	220	220	220	220	220
最高线电压 U_{max} (V)	381	440	418	440	429
线电压损失 $U_s(V)$	59	0	22	0	11
$U_{max}/U\Phi$ 比例	1.73	2.00	1.90	2.00	1.95
线电压损失率 δ (%)	15.5	0	5.3	0	2.6
经桥式整流后最高直 流电压(V)	537	622	591	622	607

[0052] 可以发现,在星形接法中,同样的相电压时,各种偶数相数电制下的最高线电压恒等于二倍相电压,不存在线电压损失。而各种奇数相数电制下的最高线电压永远低于二倍相电压,都有或多或少的线电压损失。如 U_s 定义为线电压损失,则:

$$[0053] U_s = 2U\Phi - U_{max} \quad (\text{式 -2})$$

$$[0054] U_s 3 = 440 - 381 = 59V,$$

$$[0055] U_s 4 = 440 - 440 = 0,$$

$$[0056] U_s 5 = 440 - 418 = 22V,$$

- [0057] $U_s 6 = 440 - 440 = 0,$
- [0058] $U_s 7 = 440 - 429 = 11V。$
- [0059] 其线电压损失率 δ 定义为：
- [0060] $\delta = U_s / U_{max}$ (式 -3)
- [0061] U_{max} 为该相制下的最大线电压。
- [0062] 各种相电制下的线电压损失率 δ 为：
- [0063] 三相： $\delta_3 = 59 / 381 = 15.5\%$,
- [0064] 五相： $\delta_5 = 22 / 418 = 5.3\%$,
- [0065] 七相： $\delta_7 = 11 / 429 = 2.6\%$
- [0066] 偶数相的线电压损失率 δ 恒等于零。
- [0067] 与六相电制相比，三相电制的线电压损失 59V，是所有多相电制中线电压损失最大的，可以说，在交流电整流成直流电的换流过程中，三相电制存在最大的线电压损失，是该电制在交直变流方面的重大内在缺陷。
- [0068] 虽然对于三角形接法来说，表面上没有线电压损失这一说法，但其另一侧面的线电流损失，也同样表现为三相制的电压利用率低这一实质缺陷。
- [0069] 随着直流电的应用越来越广，怎么样提高三相电制的整流效率，成为提高电能使用效率的重大课题。
- [0070] 目前，三相电制已经成为全球最大的巨能量大系统，以更高相制替代三相制牵涉面太大，是不现实的，那么比较切实可行的解决方案，就是在整流器之前将三相电制改变为六相电制。
- [0071] 所以从 AC/DC 整流器的效率而言，六相整流器的效率明显高于三相，因为它的电压利用率比较高，或者也可以说它没有线电压损失。但是问题是，今天全球电网都采用三相电制，除了增加倒相变压器外，无法得到六相电。
- [0072] 图 5 即为本发明中，通过倒相变压器 T1 将三相电变换为六相电的示意图。所以，为了提高整流器和变压器的效率，变压器采用自耦变压器结构，但必须增加一个变压器和将三相整流器换成六相整流器，可见其成本高体积大，在经济上的可行性差。
- [0073] 这个问题可以通过虚拟六相整流器加以解决。采用虚拟六相整流器，就可以无需倒相变压器和将三相整流器换成六相整流器，在整流器不变的前提下，也无须六相电，仍采用三相电，获得与六相电制下一样高的整流效率。
- [0074] 图 6 为本发明变流器中的虚拟六相整流器的原理线路图。仔细分析不难发现，整流过程中的整流管也同样有倒相作用，以 A 相为例，在 A 相的正半周，A 相电流从二极管 D3 通过并到达直流输出的正端，对电容器 C1 充电；在 A 相的负半周时，A 相电流从二极管 D6 通过并到达直流电压的中间端，对电容器 C2 充电。由于 C1 与 C2 同向串联，这样，就相当于将负半周反向了，与变压器所起的作用相同。但这一简化线路可以省去一个倒相变压器和六相整流器，经济性可观，还能将整流效率提高约 15%。
- [0075] 采用虚拟六相整流器，就可以得到比普通整流器更高的效率，高效率的具体测试数据已为实验所证实。有关虚拟六相整流器资料详见中国专利申请 201310381920.8《虚拟六相整流器电源装置》。
- [0076] 在图 1 传统的基本型 3 变 1 变流器线路中，全部单相功率都由变流器承担。即使

上述带虚拟六相整流器的变流器，也均需要处理全功率的电能。能不能使变流器所需的容量降下来以节约设备成本，下面为本发明开发的其他方案。

[0077] 如果按本发明图 1 中的线路，把三相中的一相，例如图中的 A 相作为基本相保留下，直接进入牵引网，而仅将其他两相经二相整流后输入 DC/AC 逆变器，将逆变器调整到 A 相输出，输出能量通过并联或串联与原有 A 相合并，然后通过合成变压器 T2 输送到牵引网中，那么 DC/AC 逆变器的功率容量只需总牵引功率容量的 2/3，约 67%，降低了逆变器的成本。调整 B 相和 C 相电流，就可以在三相平衡的前提下，消除负序电流。同时，由于只处理部分功率，所以整体能源转换效率也将有所提高。本发明方案的实施线路在图 7 中。

[0078] 图 7 为本发明的仅将三相电压中的 2 相电子逆变线路结构图。

[0079] 在图 7 中，二相的相电压 U_b 、 U_c 接入一个二相倍压整流器的交流端，然后将二相的零线接入串联电容器 C_1 和 C_2 的中点，电容器 C_1 和 C_2 的两端分别接直流输出的正负两端。整流后的直流电压再经逆变器 DC/AC 逆变成为 a 相输出，与未经处理的 A 相一起，通过变压器 T2 合成为一个单相输出，最后接入牵引网。调整整流器和逆变器的功率因数，使三相功率平衡，就可以将平衡的三相功率改变为单相功率输出。其特征是，保留 a 相；b 和 c 相接二相整流器，整流器输出的直流再逆变为 a 相电；两部分 a 相电分别接入合成变压器 T2 各自的初级绕组，次级绕组接到牵引网。

[0080] 注意在图 7 的线路中，如果不接零线，就等同于将一个交流线电压输入一个单相桥整流桥，不但整流效率低，纹波大，滤波困难；而且由于电流 I_b 与 I_c 相同，不符合三相电流数值和功率因数相同的要求，三相功率的平衡也很难保证。

[0081] 除了采用纯电力电子的方法，将平衡三相功率转变为单相功率，实现消除铁路换相区的目的外，也可采用辅助变压器来实现三相功率单相化、消除换相区的目标。

[0082] 第二种减少逆变器功率容量的方法是采用变压器分相，见图 8。

[0083] 图 8 为三相向量电压分解示意图。

[0084] 本方案沿袭了上例中对三个线电压分别处理的思路。假定仍保留 a 相的 U_a 不变，则可先将 U_b 分解为 U_{bd} 和 U_{bq} 、 U_c 分解为 U_{cd} 和 U_{cq} 。

[0085] 与 a 相平行的同相电压分量 U_d 和相垂直的电压分量 U_q ，可以通过向量叠加，分别在两个变压器 T3 和 T4 中形成。

[0086] 图 9 为向量合成变压器 T3 和 T4 绕线方向简图。

[0087] 结合图 8 的向量图和图 9 的变压器绕线图，可以分析出，在变压器 T3 中，b 相进线方向与 c 相进线方向一致， U_{cd} 和 U_{bd} 同向相加，d 向电流和功率加倍，而 U_{cq} 和 U_{bq} 反向抵消没有 q 向电流。所以只剩下电压 U_d 起作用， U_d 与 U_a 幅值相同而方向相反，倒向后则可与 U_a 一起输入合成变压器 T2，使 a 相功率加倍。

[0088] 在变压器 T4 中，b 相进线方向与 c 相进线方向相反， U_{cq} 和 U_{bq} 变成同向同相位，q 相电流和功率加倍，而 U_{cd} 和 U_{bd} 则反向相减而抵消，所以只剩下电压 U_q 及其产生的电流。 U_q 还必须通过整流和逆变，改变为 U_a 输出，最后也一起进入 T5 变压器合成，与其它两路 U_a 合并输入牵引网。为此，就可以通过合适控制，将一个平衡的三相功率，改变为单相输出，进入不需要分相区的铁路牵引网。

[0089] 图 10 为采用三变压器的 3 相变 1 相原理线路图。三变压器的 3 相变 1 相原理线路的技术特征是，取其中一相电压直送合成变压器 T2 的初级绕组；合成变压器 T3 的次级绕

组接合成变压器 T2 的第二个初级绕组 ; 合成变压器 T4 的次级绕组经整流逆变相位变换后与上列相同相位的交流电 ; 变流器输出接合成变压器 T2 的第三个初级绕组 ; T2 的次级绕组接到牵引网。

[0090] 由三角学计算可得, 经过向量分解和变压器合成后, 如以 $U_a \cdot I = 1$ 为单位, 则在线路对称, 功率因数相同的平衡输入中, 垂直方向的功率为 $(U_a + U_d) I = 2$, 水平方向的功率为 $U_q I = \sqrt{3}$, 约等于 1.73。

[0091] 将水平方向的电能通过电子逆变器转换 a 相功率, 忽略损耗, 可以计算得到逆变功率占总牵引功率之比为 :

[0092] $1.73 / 3.73 \approx 46.4\%$ 。

[0093] 上例中的三合成变压器 + 电子变流器方案中, 也可以采用三角形接法的三相电线电压输入的结构, 因为目前接触牵引网都采用线电压输入的结构。其特征是, 合成变压器 T3 和 T4 采用相电压分相或线电压分相的不同结构。

[0094] 图 11 为本发明的采用旋转磁场变压器和电子变流器的 3 相变 2 相线路简图。

[0095] 采用一种特殊的、称为旋转磁场变压器的新型装置, 可以先把平衡三相电改变为平衡二相电, 然后再通过电子变流, 最后将二相电中的一相转移到另一相中, 最终成为单相电, 输入同相牵引供电网。

[0096] 旋转磁场变压器是从电机结构的启示中发明的一种新型变压器结构, 利用电机中的旋转磁场实现改变相数, 同时利用两个绕组的匝比改变电压, 实现变压器功能, 所以, 旋转磁场变压器既能像传统变压器一样, 改变交流电压, 还能改变相数。

[0097] 旋转磁场变压器的结构相当于一台绕线式感应电机。变压器的初级为原电机的定子绕组, 变压器的次级为原电机的转子绕组, 由于取消了电机的转动功能, 所以不再需要保留气隙, 定子转子间实现零间隙磁路, 磁阻和空载电流比普通叠片式变压器还小, 是一种节能型变压器新品种, 也可以看作一种经过性状改变的特殊电机结构。

[0098] 定子上有三相星形或三角形结构的分布绕组, 转子上为二相分布绕组。本发明与交流电机所不同的是, 本处的变压器不需要轴, 如果是多极对数电机, 也不需要靠近轴处的铁心, 而只要一个环状体磁轭就可以完成磁回路。

[0099] 由于定转子中的旋转磁场, 使初级绕组与次级绕组紧密交链耦合, 就可以将原边初级绕组中的三相电变成副边次级绕组中的二相电, 例如 U_d 和 U_q , 同上例相似, 将 U_q 通过电子变流, 移相到 U_d 相位的同频交流电, 就可以实现单一 U_d 化, 电子变流器只需承担 50% 的总容量。其特征是, 系统内有一台旋转磁场变压器; 由旋转磁场变压器将平衡三相电改变为平衡二相电; 由电子变流器实现同相化。

[0100] 有关旋转磁场变压器的详尽资料, 可见中国发明专利申请 201310111574.1《采用旋转磁场原理的多相变压器》, 本说明书无须赘述。

[0101] 图 12、本发明的采用旋转磁场变压器和电子变流器的 3 相变 1 相系统简图。

[0102] 旋转磁场变压器 T5 将平衡三相电转变为等值的平衡二相电 U_d 和 U_q , 然后将 U_d 直接接入合成变压器 T2 的一个初级绕组, 将电压 U_q 经过整流后, 借助电力电子逆变器改变为与 U_d 同相电压输入 T2 的另一初级绕组, 次级绕组则可获得单相交流电供牵引网使用。

[0103] 在上述各实施例中, 方案设计已考虑到三相电在转换为单相电过程中的平衡问题, 以抑制负序功率。必要时, 还可以对交 / 直变换器(整流器)、逆变器作控制调节, 以达

到三相电的平衡供电。

[0104] 同相供电系统的基本构成：理想的高速铁路牵引供电系统应采用同相供电，并且全线拉通，称为贯通式同相供电，从机车取流的角度看，它相当于双边或多边供电。目前，我国电力系统的管理现状要求高压环网，低压解网，呈树状供电。于是，分区所处的两侧虽为同相电压，但正常运行时却不能贯通。

[0105] 同相供电范围内的若干个牵引变电所产生的负序电流（功率）将同相叠加，比现行经换相的异相供电方式要严重得多。因此，同相供电的关键是负序问题，解决负序问题就需要对称补偿。经各种接线变压器和对称补偿构成的单相供电系统可称为三相-单相对称补偿系统，它与单相变压器一样，可避免在牵引变电所出口采用电分相。两者最主要的区别在于对负序的抑制能力。但即使是在同一电力系统中，不同进线处的系统短路容量不同，承受负序的能力也不同。于是，为了减少不必要的投资和设备浪费，可将同相供电系统中的牵引变电所分为三种：一是全补偿，它要求实现对称补偿，特别是对负序有极好的抑制能力；二是半补偿，即对补偿负序有适度要求；三是不补偿，只用牵引变压器。

[0106] 当然，三种牵引变电所中，无功补偿可能都是必要的。同相供电系统主要由牵引变电所中的牵引变压器、对称补偿系统和牵引网组成。其中的成本从系统由电容性和感性无功元件组成，实现对无功和负序的综合补偿。

[0107] 单相电还可以从直流输电网获得，方法是通过电子逆变器直接将直流电变换为单相交流电。这样，从太阳能电池 PV 所产生的直流电，可以通过单相逆变器，就近直接输送到电气化铁路的牵引网中。其特征是，牵引馈电的输入为直流电，尤其是由太阳能电站或风电网供给的直流电。也就是说，直流电是来源于分布电网中的清洁能源。

[0108] 由于直流高压输电 HVDC 在远距离输电和通过电缆输电方面，相当于交流输电的特有优势，可以将高压直流电直接输送到电气化铁路的牵引网。但是，直流电的缺点是改变电压困难，为此，可以采取较低电压的 DC/AC 相串联接入高压直流的办法，将直流高压输电网的直流电能逆变成交流单相电的技术路线。

[0109] 图 13 为直流供电的电气化铁路的牵引网。

[0110] 图中，串联单元逆变器（1）由低压逆变器 DC/AC 和一个并联开关组成。由若干个相同的单元逆变器串联后接入高压直流电网中，低压逆变器的输出接合成变压器 T6 的一个初级绕组，次级绕组就能归纳各初级绕组的单相交流输出，向电气化铁路的牵引网馈电。每个低压逆变器中的并联开关用于在该逆变器发生故障时，由控制信号将并联开关短接，以切除该故障逆变器。由于低压逆变器数量比较多，所以短接一个甚至几个低压逆变器，只能使继续工作的低压逆变器负担不多的电压和功率增量，对低压逆变器和整个直流变交流单相系统的正常工作影响不大。其特征是，牵引馈电的输入为高压直流电；串联单元逆变器（1）由低压逆变器 DC/AC 和一个并联开关组成；由若干个相同的单元逆变器串联后接入高压直流电网中。

[0111] 低压逆变器个数由其输入电压的大小和直流电网电压高低来选择。

[0112] 本发明披露了多种无分相区电气化铁路牵引馈电网的具体结构，这些结构均较传统的三相变单相纯电力电子方案省能节材，优点显著。至于电气化铁路牵引网的单相化，所带来的铁路建设成本的降低，和列车运行的方便和安全，更是优势明显的技术进步。

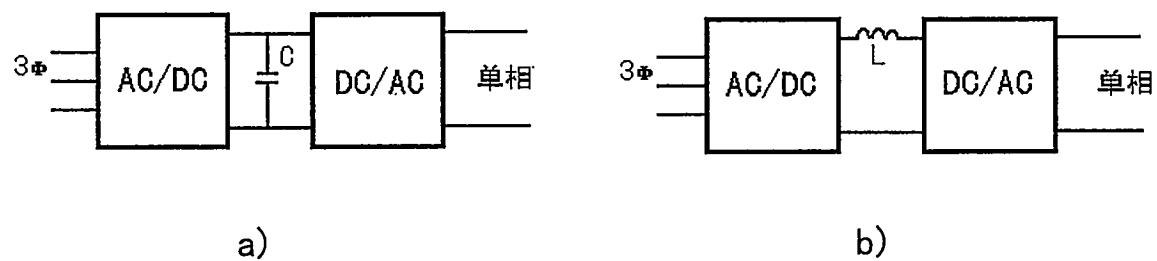


图 1

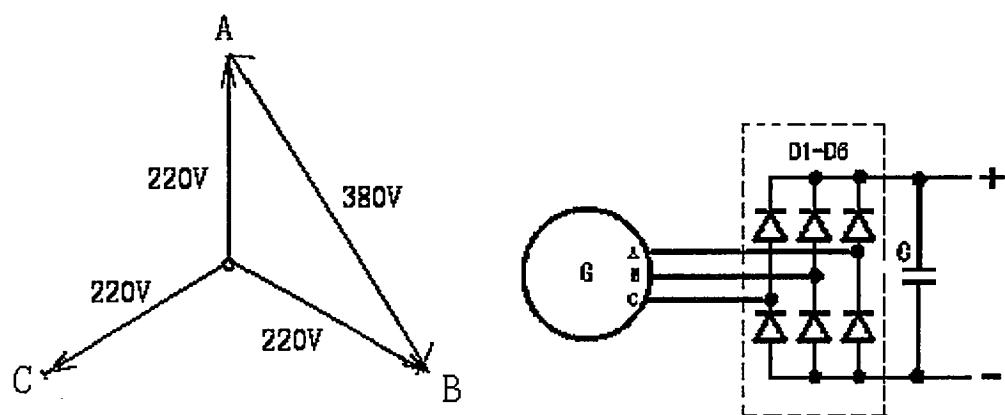


图 2

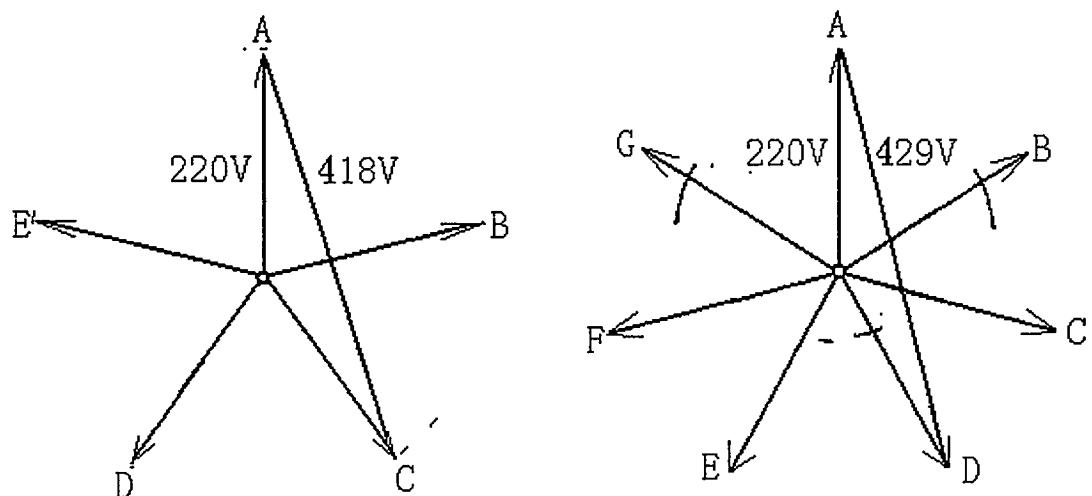


图 3

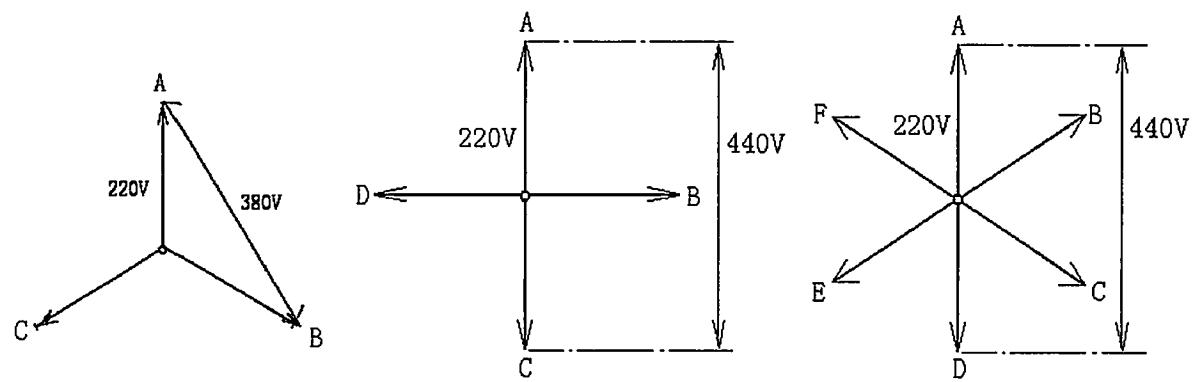


图 4

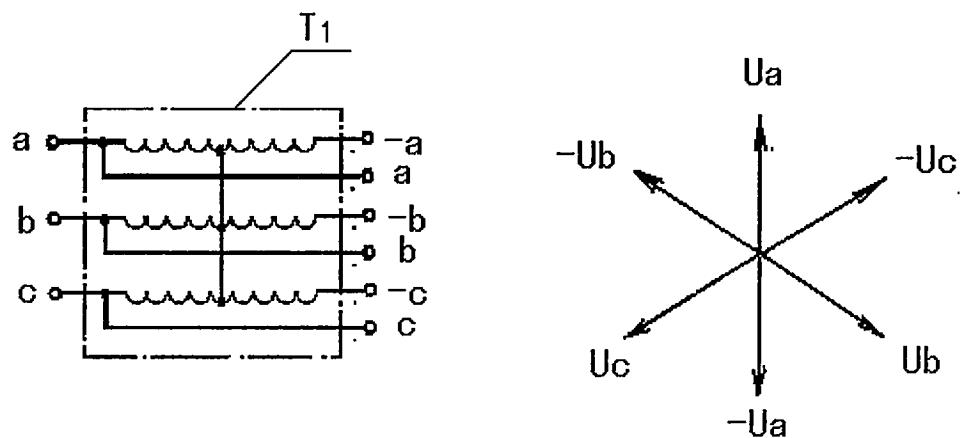


图 5

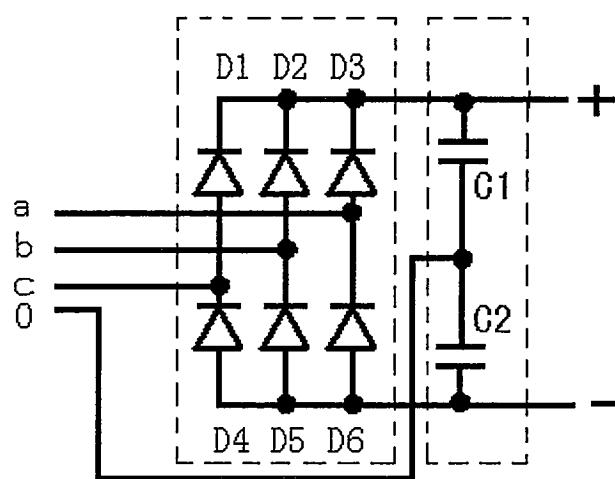


图 6

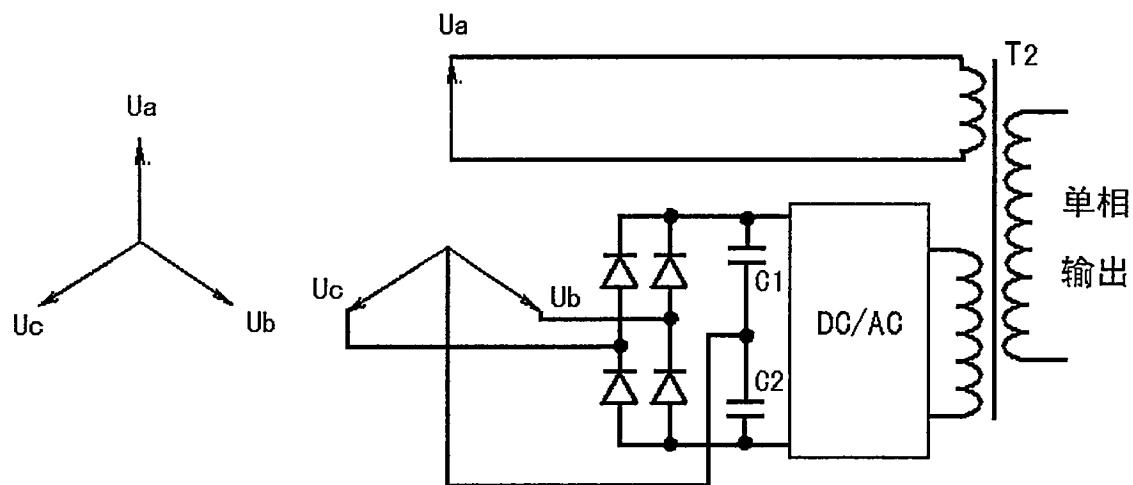


图 7

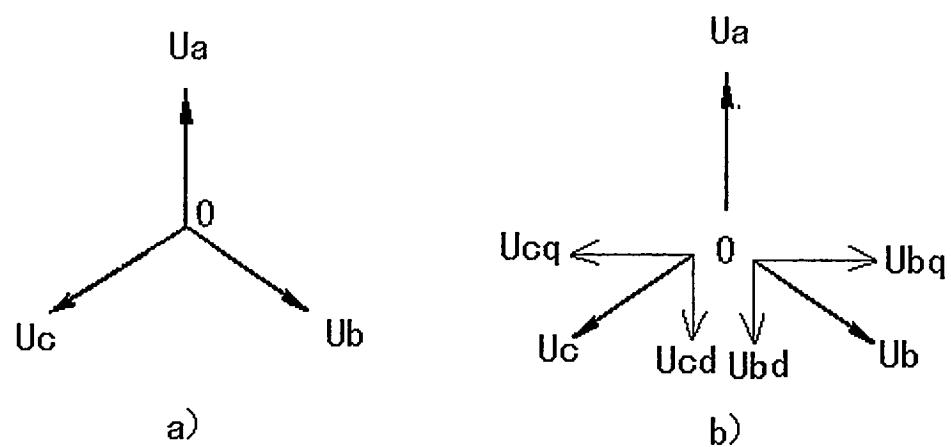


图 8

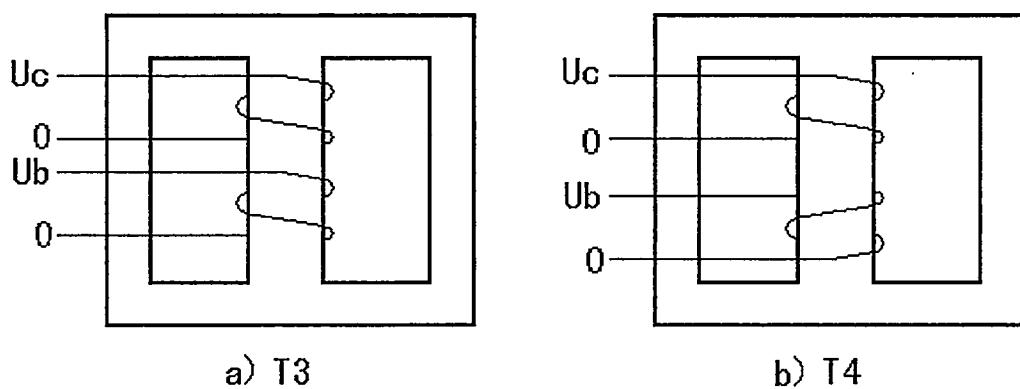


图 9

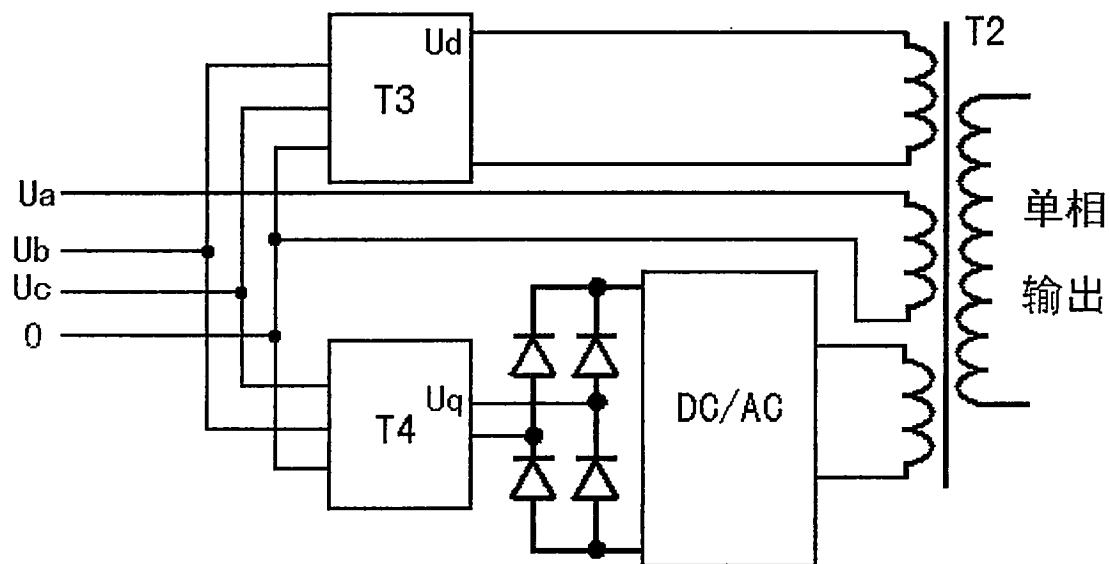


图 10

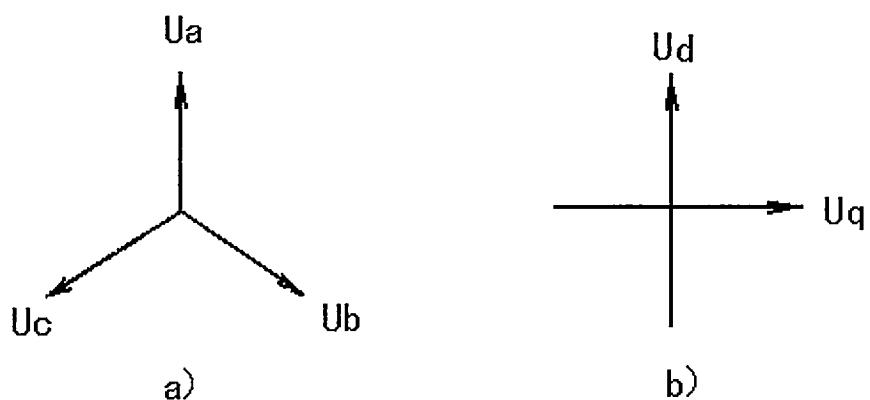


图 11

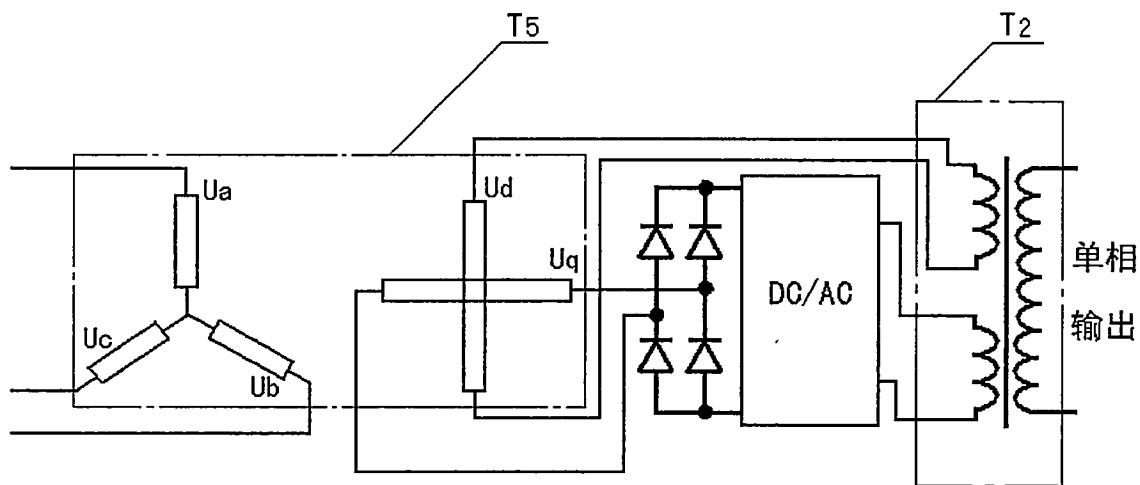


图 12

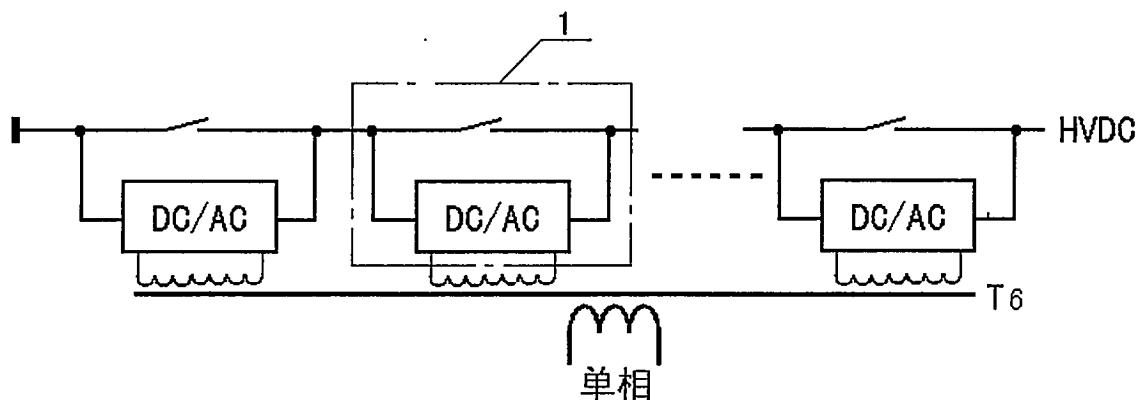


图 13