

高性能交直交牵引变电所主电路结构及控制策略研究*

李林蔚, 闫一凡
(中车工业研究院有限公司, 北京 100070)

摘要: 交直交牵引变电所可以实现电气化铁路的电能质量综合治理,并具备贯通供电的能力。然而,传统交直交牵引变电所方案在既有牵引变电所基础上的改造难度大,适应性差,且故障工况下容错性能差。针对该问题,提出了一种适应性强且容错性好的交直交牵引变电所方案。该方案保留了传统牵引变电所的主电路形式,并在三相-两相牵引变压器的副边绕组分别接入一套整流器,将直流环节并联,形成公共直流母线。逆变器直流输入端接入公共直流母线,输出端接入牵引网,解决了电能质量和电分相问题。相比于现有的交直交牵引变电所方案,所提方案的改造难度小、适应性强、可靠性高。在 MATLAB/Simulink 中建立了仿真模型并进行了仿真分析,验证了该方案的可行性和正确性。

关键词: 交直交牵引变电所; 变压器; 电气化铁路; 故障工况; 容错性能
中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)06-0078-10
doi: 10.12177/emca.2023.051

Research on Main Circuit Structure and Control Strategy of High Performance AC-DC-AC Traction Substation*

LI Linwei, YAN Yifan
(CRRC Academy Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: AC-DC-AC traction substation can realize the comprehensive treatment of power quality of electrified railway and has the ability of continuous power supply. However, the traditional AC-DC-AC traction substation scheme is difficult to transform based on the existing traction substation, and has weak adaptability and poor fault tolerance performance under the fault conditions. To solve these problems, a scheme of AC-DC-AC traction substation with strong adaptability and high fault tolerance is proposed. The scheme retains the main circuit form of the traditional traction substation, and it connects a set of rectifiers to the secondary windings of the three-phase-two-phase traction transformer respectively, and the DC-links is connected in parallel to form the common DC bus. The DC input of the inverter is connected to the common DC bus and the output is connected to the traction network, which solves the problems of power quality and phase separation. Compared with the existing AC-DC-AC traction substation scheme, the proposed scheme is of little difficulty, strong adaptability and high reliability. The simulation model is established in MATLAB/Simulink and the simulation analysis is carried out, which verifies the feasibility and correctness of the scheme.

Key words: AC-DC-AC traction substation; transformer; electrified railway; fault condition; fault tolerance performance

收稿日期: 2023-02-06; 收到修改稿日期: 2023-02-28
* 基金项目: 中车重大项目(2020CKA001)
作者简介: 李林蔚(1986—),男,博士,工程师,研究方向为电气化铁路电能质量治理、功率变换器拓扑与控制技术。
闫一凡(1985—),男,硕士,高级工程师,研究方向为轨道交通机车车辆。

0 引言

采用异相供电方式的传统电气化铁路存在无功、谐波和负序等电能质量问题以及由负载单相性引起的电分相问题^[1-3]。这些问题不仅影响电网的正常运行,还会导致列车间断取流,导致速度损失以及牵引力下降,制约高速铁路的发展。文献[4-5]提出的基于有源补偿器(APC)的同相供电系统可以综合解决电能质量问题,但其仅取消了一半的分相区,理论上无法实现贯通供电。

交直交牵引变电所采用电力电子变换器,可控制潮流,实现无功、谐波和负序治理以及取消分相区,具备贯通供电的能力,具有良好的应用前景,是一种较为理想的牵引供电方式,已有大量文献对交直交牵引变电所的主电路结构进行了研究。文献[6-7]提出了一种基于电力电子变压器(PET)的交直交变流器,应用DC-DC双有源桥(DAB)变换器,很好地实现了电网与牵引网的隔离。但文献[6]中交流输出侧并联,存在环流问题。文献[7]采用二极管中点钳位(NPC)变换器,存在固有的中点电位偏移问题,控制上存在困难。文献[8]提出了一种基于PET的三相-单相交直交变换器,以实现牵引网贯通供电。但该结构输入侧采用级联整流器直挂三相电网,需要大量的功率器件来承受三相电网的高电压、大功率等级,成本过高,可行性不强。文献[9-11]提出了基于模块化多电平变换器(MMC)的交直交牵引变电所。但MMC结构在运行过程中存在环流,且控制复杂,在电气化铁路实际应用中存在困难。另外,上述基于三相-单相的交直交同相供电结构均需要新建牵引变电所,在原牵引变电所基础上进行改造的难度极大、适应性差、兼容性不强,且上述结构可靠性低,容错性能差。

目前,对于交直交牵引变电所的研究主要集中在拓扑结构和控制策略方面,对其故障运行方面的研究较少。然而,交直交牵引变电所主电路中含有大量的电力电子变换装置,这些变换装置可靠性低、故障率高。因此,研究易于改造的交直交牵引变电所及其故障工况下的运行方案具有重要意义。

考虑上述因素,本文提出了一种交直交牵引变电所方案。该方案在传统牵引变电所主电路基

础上加入了交直交电能变换装置,并将传统牵引变电所的两相输出作为备用回路,改造难度小,兼容性强,且故障工况下具有较强的容错性能。分别在正常工况和故障工况下,应用MATLAB/Simulink对所提方案进行了仿真分析,验证了该方案的可行性。

1 系统结构及运行原理

1.1 系统结构

本文提出的交直交牵引变电所主电路结构如图1所示,其主要由三相-两相牵引变压器、交直交系统以及备用回路组成。牵引变压器原边接入三相电网,副边每个牵引绕组各接入一套整流器,如图1中整流器1和整流器2。交直交系统由两套整流器和一套逆变器组成。整流器输出侧采用并联结构,形成公共直流母线,便于光伏、储能等新能源系统的接入。逆变器输入侧接入公共直流母线,输出侧接入牵引网,为牵引负荷供电。此外,逆变器通过控制输出电压和潮流,可彻底取消分相区,具有实现贯通供电的能力。PWM功率器件的可靠性低、故障率高,因此将原牵引变压器的两条输出回路作为备用回路。该交直交牵引变电所只需在传统牵引变电所基础上加入交直交功率变换装置,改造难度小,具有良好的兼容性。正常工作时,其由交直交系统供电,解决电网侧电能质量问题的同时取消分相区。在整流器或逆变器故障时,投入备用回路,并变换电路结构,进行模式转换,实现高可靠性供电。值得说明的是,整流器和逆变器可以作为简单的全桥电路,也可以作为应用于大功率场合的多电平电路。本文采用前者进行运行原理及控制策略的分析。

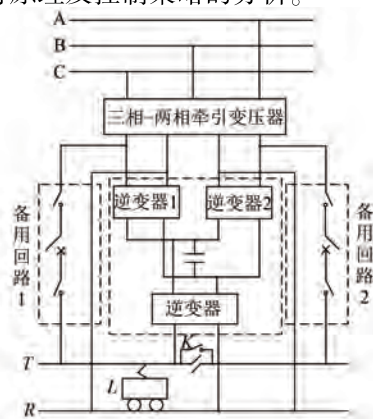


图1 交直交牵引变电所主电路

1.2 运行原理

1.2.1 正常工况

正常运行时,备用回路隔离开关闭合,断路器断开,呈热备用状态,如图2所示。电分相处开关 K 闭合,系统通过两套整流器和逆变器为牵引负载供电。整流器通过有功和无功功率控制,解决无功、谐波和负序等电能质量问题,并实现能量的双向流动。逆变器控制交流侧输出电压的幅值和相位,外特性为电压源,其由牵引负荷供电。由于交直交系统直接输出幅值和相位可控的单相交流电能,可取消变电所出口处的电分相。在同一线路上存在多个交直交牵引变电所时,通过集中控制(集中控制器统一下发输出电压的幅值和相位)或分布式控制(一个变电所投入运行后,其他变电所依次锁定其输出电压的幅值和相位)进行并联运行,取消分区的电分相,实现全线贯通。

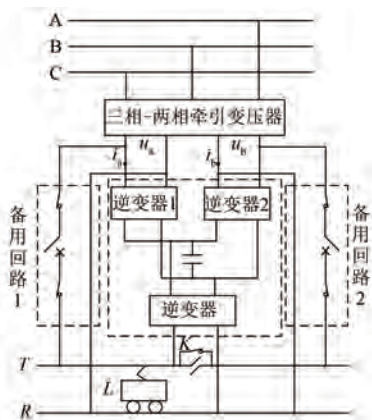


图2 正常运行工况示意图

1.2.2 故障工况

两套整流器均发生故障或整个交直交系统发生故障的概率极小。若出现上述情况,需切换至传统供电方式,如图3所示。此时,需断开牵引变电所出口处的开关 K ,恢复分相区。若同一线路相邻的牵引变电所正常运行,则左侧牵引变电所逆变器输出电压可锁定故障牵引变电所左臂输出电压相位,右侧牵引变电所逆变器输出电压可锁定故障牵引变电所右臂输出电压相位,可以取消分区所处的分相区,只有故障变电所出口处分相区无法取消。若相邻两个牵引变电所均存在此类型故障,则处于两个牵引变电所之间的分相区也无法取消,但该种类型故障概率极低。对于故障工况,本文重点针对任一整流器故障或逆变器故障进行分析。

障进行分析。

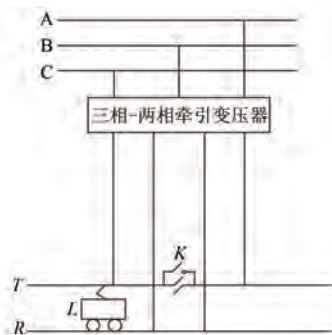


图3 两套整流器均故障或交直交系统故障后的主电路示意图

(1) 任一整流器故障。以整流器1故障为例,整流器1故障后,闭合同侧备用回路1,故障后供电原理如图4所示。系统通过左臂给牵引负荷供电,利用整流器和逆变器构成的背靠背系统进行有功和无功控制,解决电网侧电能质量问题,并补偿负载的无功和谐波。该工况下,若同一线路相邻的牵引变电所以正常工况运行,则正常运行的牵引变电所逆变器输出侧可锁定该故障变电所输出电压的相位,依然可取消分区所处的电分相,实现贯通供电。但若相邻的两个牵引变电所均出现此类型故障,则处于两个牵引变电所之间的分相区无法取消。

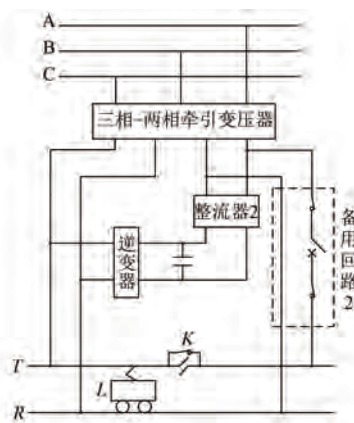


图4 整流器1故障退出运行后主电路示意图

值得说明的是,文中“交直交系统”与“背靠背系统”是两个不同的定义。“交直交系统”是指正常工况下由两套整流器和一套逆变器组成的系统。“背靠背系统”是指故障工况下由整流器和逆变器或由两套整流器组成的系统,直流

环节并联。

(2) 逆变器故障。逆变器故障后, 闭合任一备用回路, 如图 5 所示。在此工况下, 采取的故障运行方案与工况 (1) 类似, 唯一不同的是此时通过两套整流器实现电网侧的电能质量治理以及负载的无功和谐波补偿。同工况 (1), 正常运行的牵引变电所逆变器输出侧通过锁定该故障变电所输出电压的相位, 依然可取消分区所处的电分相, 实现贯通供电。但若相邻两个牵引变电所均故障, 则无法取消处于两个牵引变电所之间的分区电分相。

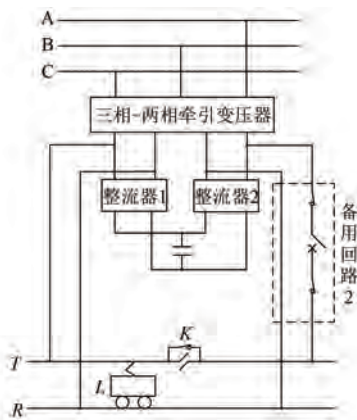


图 5 逆变器故障退出运行后的示意图

由此可见, 正常运行工况下, 系统可彻底取消分相区。但在牵引变电所故障时, 存在恢复分相区的情况。

1.3 对比分析

文献[6-7, 9-11]中的交直交牵引变电所方案均可表示为图 6 所示的结构, 在解决电网侧电能质量问题的同时, 具有贯通供电的能力。从图 6 中可以看出, 整流器或逆变器发生故障退出运行会导致牵引网失电, 影响列车运行。为应对此

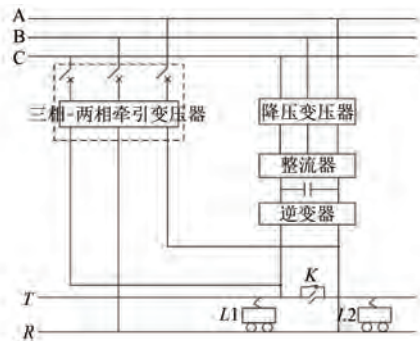


图 6 现有交直交牵引变电所主电路示意图

问题, 通常保留传统牵引供电方式, 如图 6 中虚线框所示。因此, 现有方案需重新制作降压变压器, 在既有牵引变电所基础上的改造难度大, 可靠性不强。此外, 在整流器或逆变器退出运行时, 需切换至传统牵引供电方式, 无法解决电网侧电能质量问题。综上所述, 本文所提方案比现有方案的适应性更强、容错性能更好。

2 控制策略

2.1 交直交系统解决负序电流问题的原理

本文中, 以斯科特 (Scott) 牵引变压器为例来说明三相-两相牵引变压器, 其示意图如图 7 所示。其中, M 座和 T 座变压器的原边绕组匝数分别为 W_1 和 $\sqrt{3}/2W_1$, M 座和 T 座变压器的次边绕组匝数相同, 均为 W_2 。由 Scott 牵引变压器原理可得, M 座和 T 座副边电压大小相等, M 座相位领先 T 座相位 90° 。

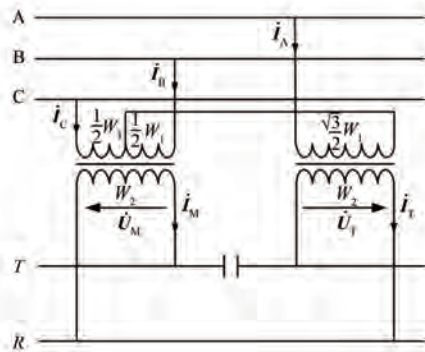


图 7 Scott 牵引变压器接线示意图

Scott 牵引变压器原边电压、次边电压和电流向量图分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示。若 Scott 牵引变压器原边三相电流分别为 I_A 、 I_B 、 I_C , 牵引绕组电流分别为 I_T 、 I_M , 则根据磁势平衡原理可得:

$$\begin{cases} I_A \frac{\sqrt{3}}{2} W_1 + I_T W_2 = 0 \\ I_B \frac{1}{2} W_1 - I_C \frac{1}{2} W_1 + I_M W_2 = 0 \\ I_A + I_B + I_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

假设 Scott 牵引变压器两供电臂负载功率因数角相等, 负荷电流幅值相等, 相位相差 90° 时, 即 $I_T = I$, $I_M = I \angle 90^\circ$, 代入式 (1) 可得:

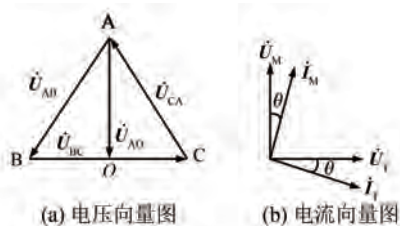


图8 Scott 变压器原边和次边电压电流向量图

$$\begin{aligned} \begin{cases} I_A \\ I_B \\ I_C \end{cases} &= \frac{2I}{\sqrt{3}K_M} \angle 0^\circ \\ &= \frac{2I}{\sqrt{3}K_M} \angle -120^\circ \\ &= \frac{2I}{\sqrt{3}K_M} \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

式中: K_M 为 M 座变压器变比, $K_M = W_1/W_2$ 。

从式(2)中可以看出,当 Scott 牵引变压器两供电臂负载电流大小相等、相位相差 90° 时,负序电流即可消除。对于图 1 所示结构,两套整流器直流环节并联,只要采用相同的电路参数、控制策略及控制参数,即可获得幅值相同的网侧电流。同时,控制两套整流器网侧电流锁定网侧电压,使两套整流器网侧电流相位相差 90° ,即可实现原边三相电流平衡。

2.2 正常工况下的控制策略

2.2.1 系统整体控制方案

系统整体控制方案包括整流器和逆变器的控制。对于整流器来说,需要控制直流环节电压及网侧电流,在稳定直流环节电压的同时解决电气化铁路无功、谐波和负序等电能质量问题。对于逆变器来说,控制逆变器模块输出电压的幅值和相位,即可控制输出电压,为牵引负荷供电,同时取消分相区,实现牵引网全线贯通。

2.2.2 整流器控制策略

图 9 为单相 PWM 整流器物理模型。其中, u_N 和 i_N 分别为网侧电压和网侧电流, u_{ab} 和 u_{dc} 分别为输入电压和直流电压, i_c 和 i_R 分别为直流环节母线电流和直流端负载电流, R_N 和 L_N 分别为整流器的等效电阻和调相电感, R_N 包括线路等效电阻、电感等效内阻和整流器损耗。

整流器的控制目标为直流电压稳定、网侧三相电流平衡、运行功率因数高和谐波含量低。

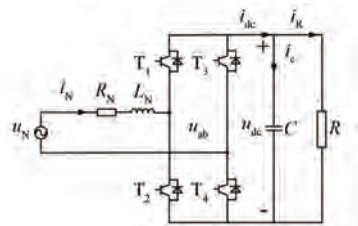


图9 整流器电路结构

根据图 9 中整流器的物理模型,运用基尔霍夫电压定律(KVL)和基尔霍夫电流定律(KCL),可得整流器的数学模型,如下所示:

$$\begin{aligned} L_N \frac{di_N}{dt} + R_N i_N &= u_N - u_{ab} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} &= i_{dc} - i_R \end{aligned} \quad (3)$$

根据式(3)可得,整流器的控制目标可通过控制直流电压和网侧电流来实现。

整流器采用直流电压外环、网侧电流内环的双环控制策略。两套整流器的控制策略相同,以整流器 1 来说明,如图 10 所示。重点对直流电压控制模块和网侧电流控制模块进行分析。

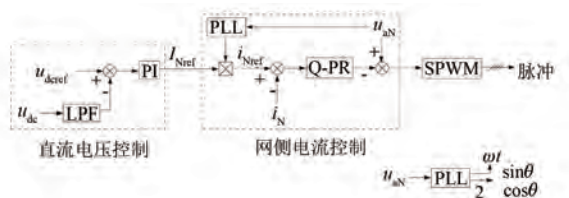


图10 整流器控制框图

(1) 直流电压控制。整流器通过控制直流电压跟踪参考值实现直流电压的稳定及能量的可靠传输。采集系统直流环节电压的实际值,将其与给定的直流电压参考值做比较,差值送入比例积分(PI)控制器。通过控制器的调节,实现直流电压的控制:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

由式(4)可得 PI 控制器的幅值增益为

$$A_{PI}(s) = \sqrt{K_p^2 + \frac{K_i^2}{\omega^2}} \quad (5)$$

式中: ω 为控制目标的角频率,当 $\omega=0$ 时, $A_{PI}(s)=\infty$, PI 控制器可以实现直流电压的无静差控制。

由于整流器为单相结构,因此在能量传输过程中,直流环节存在二倍频脉动(100 Hz)。本文中,采用低通滤波器(LPF)滤除二倍频分量,其截止频率应小于 100 Hz。但截止频率过低则会导致系统动态性能降低。通常情况下,截止频率应大于 50 Hz。本文采用巴特沃斯二阶 LPF,其传递函数如下所示:

$$G_F(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (6)$$

式中: $\zeta=0.707$ 为阻尼比; ω_0 为截止频率。

(2) 网侧电流控制。网侧电流控制中,将直流电压外环 PI 控制器的输出作为网侧电流控制内环的幅值参考。通过 2.1 节分析可知,采用锁相环(PLL)锁定 Scott 变压器副边绕组的电压相位,使副边电流相位相差 90° 即可消除负序电流,实现网侧三相电流平衡。

比例谐振(PR)控制器的传递函数如下所示:

$$G_{PR}(s) = K_P + \frac{2K_R s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (7)$$

式中: K_R 为谐振增益;此时电网频率为 50 Hz, $\omega_0 = 2\pi \times 50 = 100 \pi$ (rad/s)。

由式(7)可得 PR 控制器的幅值增益为

$$A_{PR}(s) = \sqrt{K_P^2 + \frac{2K_R \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}}^2 \quad (8)$$

由式(8)可以看出,当 $\omega = \omega_0$ 时, $A_{PR}(s) = \infty$, 因此 PR 控制器可以实现交流量的无静差跟踪。但在目标频率处,PR 控制器带宽过窄,对频率波动过于敏感,鲁棒性较差。因此,采用准 PR 控制器,加入参数 ω_c ,可增加目标频率处的带宽,增强鲁棒性。当频率出现微小波动时,仍可保持较大增益。准 PR 控制器表达式为

$$G_{QPR}(s) = K_P + \frac{2K_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (9)$$

假设电网频率最大波动为 0.8 Hz,则 $\omega_c = 2 \times 0.8 \times \pi = 5$ (rad/s)。

网侧电流控制环节的输出与网侧电压的差值作为调制波,与载波进行调制输出开关器件的脉冲信号。

2.2.3 逆变器控制策略

系统正常运行时,逆变器控制输出电压的幅值和相位,对外表现为电压源,可为负载提供单相

电能,且具有取消分相区的能力。采用输出电压有效值外环、瞬时值内环的控制策略,如图 11 所示。

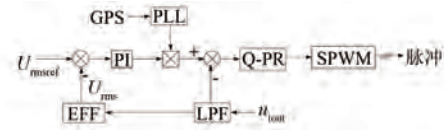


图 11 逆变器控制框图

有效值外环中,对输出电压进行滤波,将取得的有效值实际值与有效值参考值进行比较,将差值送入 PI 控制器。PI 控制器的输出作为瞬时值内环的幅值给定,乘以 PLL 后作为瞬时值的参考值。将其与滤波后的输出电压作差,差值送入准 PR 控制器,得到调制波。通过调制得到逆变器功率器件的触发脉冲。有效值参考值和各变电所的相位信息由主控系统统一下发。

2.3 故障运行工况下的控制策略

根据图 4 和图 5 可知,1.2.2 节中阐述的两种故障工况的等效电路是相同的,如图 12 所示。由正常运行的整流器和逆变器/整流器组成背靠背系统,进行网侧电能质量治理,并补偿负载的谐波和无功。

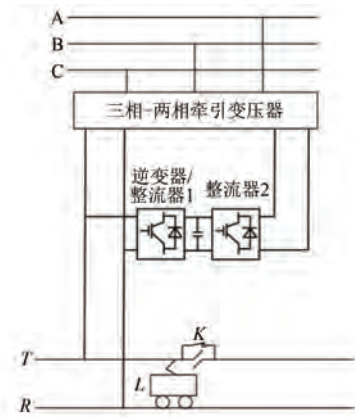


图 12 故障工况等效电路图

由 Scott 牵引变压器实现网侧三相平衡的原理可得,背靠背系统中,整流器 2 控制直流电压和网侧电流,向逆变器/整流器 1 传递一半的负载有功功率,逆变器/整流器 1 控制输出侧电流,补偿一半的负载有功功率,并补偿负载的无功和谐波电流。首先,需要对负载电流 i_L 进行分解,得到有功分量、无功分量和谐波分量。

在单相电路中,通常采用鉴相法进行负载电流分量的检测。设瞬时电流为

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) +$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = i_1(t) + i_h(t) \quad (10)$$

式中: $i_1(t)$ 为电流基波分量; $i_h(t)$ 为电流谐波分量。

α - β 坐标系中,对电流进行分解可得:

$$i(t) = I_1 \cos\varphi_1 \sin\omega t + I_1 \sin\varphi_1 \cos\omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \sin(n\omega t + \varphi_n) = I_p \sin\omega t + I_q \cos\omega t + I_h = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (11)$$

式中: $i_q(t)$ 与 $i_p(t)$ 分别为无功与有功电流分量。

上式两边分别乘以 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$,再进行低通滤波,可得电流有功分量和无功分量,如下所示:

$$\begin{aligned} \square \text{LPF}[i(t) \sin\omega t] &= \frac{1}{2} I_p \\ \square \text{LPF}[i(t) \cos\omega t] &= \frac{1}{2} I_q \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)乘以2后,再分别乘以 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$,即可得到有功电流分量 $i_p(t)$ 和无功电流分量 $i_q(t)$ 。最后,用总电流减去有功电流分量和无功电流分量即可得到谐波电流分量 $i_h(t)$ 。检测算法框图如图13所示。

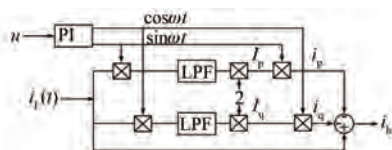


图13 电流检测算法框图

图14为背靠背系统主电路示意图。主要实现有功功率补偿和无功谐波补偿两个功能。随着交直交牵引传动系统的广泛应用,目前列车的无功和谐波含量已经大幅降低,因此有功功率补偿

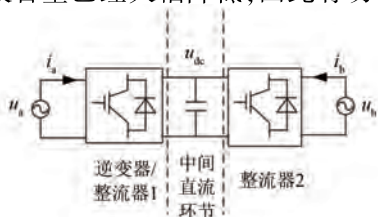


图14 背靠背系统电路示意图

是背靠背系统最基本且重要的功能。在仿真中采用电阻来等效列车,主要对有功功率补偿(负序电流治理)效果进行了验证。

(1) 有功功率补偿。根据 Scott 牵引变压器解决负序电流的原理可知,由整流器2控制中间直流环节电压,并向逆变器/整流器1传递一半的负载有功功率,使 Scott 牵引变压器两个副边绕组的有功功率相等,即可实现电网侧三相电流平衡。由于 u_a 和 u_b 幅值相等, i_a 和 i_b 幅值则等于负载电流有功分量的一半,各自锁定网侧电压相位,即可实现控制目标。

(2) 无功和谐波补偿。背靠背系统中,逆变器/整流器1与负载相连。进行无功补偿时,逆变器/整流器1与静止同步补偿器(STATCOM)的运行原理相似。进行谐波补偿时,可将逆变器/整流器1看作有源滤波器(APF)。控制逆变器/整流器1吸收负载的无功和谐波电流,实现无功和谐波补偿。需要说明的是,只由逆变器/整流器1负责负载的无功和谐波补偿,整流器2不产生/吸收无功和谐波电流,且不与逆变器/整流器1交换无功和谐波功率。

背靠背系统的控制框图如图15所示。其中,图15(a)为整流器2的控制策略,图15(b)为逆变器/整流器1的控制策略。

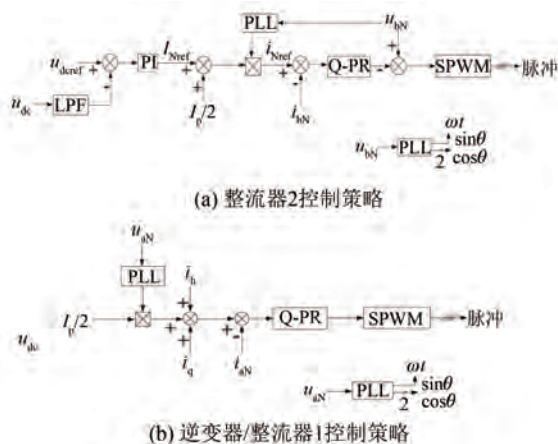


图15 背靠背系统控制框图

整流器2稳定直流电压,将负载电流分解后的有功分量的一半和电压环的输出之和作为电流环的幅值参考,向逆变器/整流器1传输一半的负载有功功率。逆变器/整流器1将负载电流有功分量的一半作为有功电流的幅值参考,提供一半

的负载电流有功分量。同时,逆变器/整流器 1 参考电流中加入了负载电流的无功和谐波分量,补偿负载的无功和谐波。通过背靠背系统的控制,可使 Scott 牵引变压器两个牵引绕组电流幅值相等,相位相差 90°,消除负序电流,实现网侧三相电流平衡。

3 仿真分析

首先对本文所提方案进行了仿真,验证了其的有效性和可行性。然后进行了现有交直交牵引变电所方案和本文所提方案的仿真对比,突出了所提方案的优势。

3.1 所提方案验证

分别进行系统故障工况前后的对比仿真,以验证本文所提方案的有效性。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

参数名称	参数值
牵引变压器(原边/副边)电压/kV	110/27.5
整流器网侧电感/mH	1.2
整流器直流环节电容/ μ F	6 000
整流器 LC 滤波电感/mH	0.423
整流器 LC 滤波电容/ μ F	6 000
逆变器输出侧电感/mH	6.4
负载/ Ω	50

3.1.1 整流器 1 故障

系统 0.5 s 前正常运行,0.5 s 时整流器 1 发生故障,退出运行,闭合备用回路 1,切换为图 4 所示电路,由整流器 2 和逆变器组成背靠背系统,解决电网侧电能质量问题,相关波形如图 16 所示。

从图 16(a)中可以看出,整流器 1 故障前,系统正常运行,三相电流对称,正弦度好,很好地解决了电能质量问题。直流环节电压能够快速响应且稳定在参考值。0.5 s 时,整流器 1 故障退出运行,系统经过 0.2 s 的暂态过程达到稳定。稳定后,三相电流对称,且依然保持良好的正弦度,因此由整流器 2 和逆变器组成的背靠背变换器能够解决电网侧的电能质量问题。电压环节响应较慢,直流电压经过约 0.25 s 的暂态过程后可稳定在参考值,保证能量的可靠传输,如图 16(b)所示。图 16(c)为负载功率和逆变器输出功率。其中, P_L 为负载功率, P_{ic} 为逆变器输出功率。可以

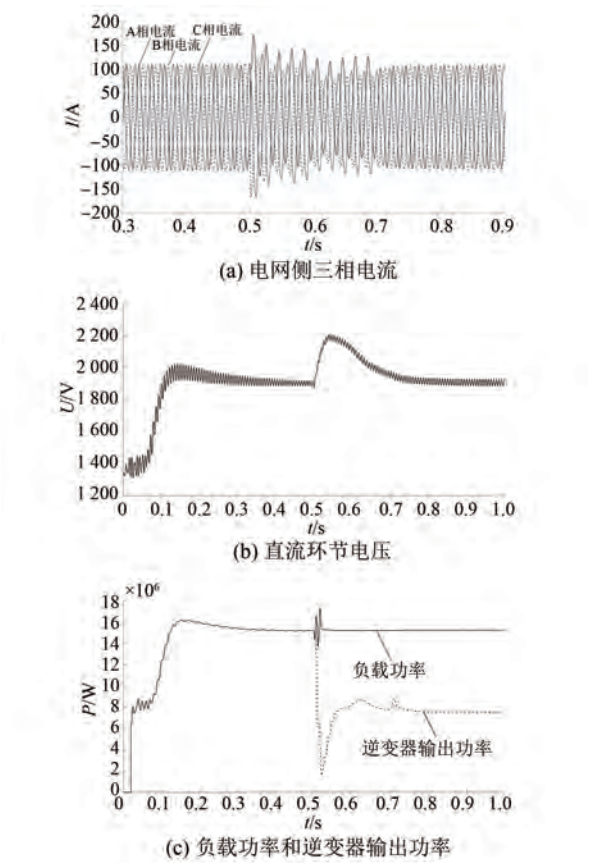


图 16 整流器 1 故障前后波形

看出,0.5 s 前,系统正常工作时,由交直交系统为负载提供能量,因此逆变器输出功率等于负载功率。0.5 s 时整流器 1 故障,退出运行,由整流器 2 和逆变器组成的背靠背系统补偿一半的负载功率,使 Scott 牵引变压器两供电臂输出的功率相等,解决电网侧的负序电流问题,实现电网侧三相电流平衡。

3.1.2 逆变器故障

系统 0.5 s 前正常运行,0.5 s 时逆变器发生故障,退出运行,闭合备用回路 1,切换为图 5 所示的电路,由整流器 1 和整流器 2 组成背靠背电路,解决电网侧电能质量问题,相关波形如图 17 所示。

系统正常运行状态已在 3.1 节有论述,不再赘述。0.5 s 时,逆变器故障退出运行,电网三相电流经过约 0.15 s 的暂态过程达到稳定。稳定后,三相电流对称,且能保持良好的正弦度,因此由整流器 1 和整流器 2 组成的背靠背变换器能够解决电网侧的电能质量问题。直流环节电压经过

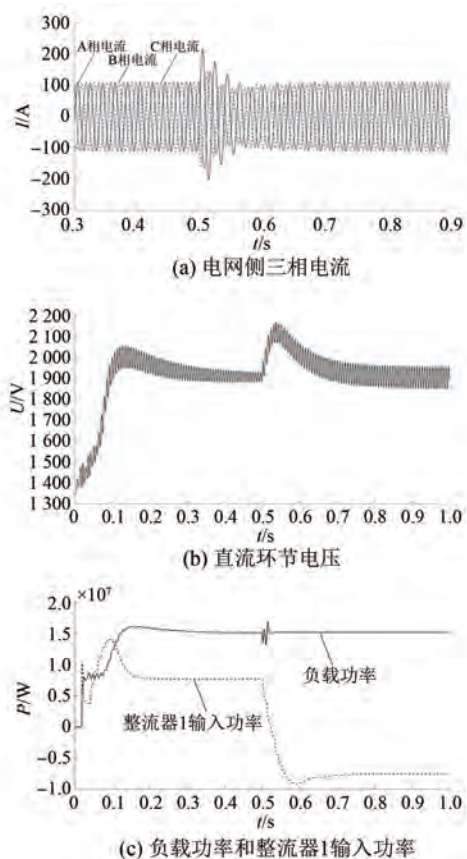


图 17 逆变器故障前后波形

0.2 s 的暂态过程后可稳定在参考值,保证能量的可靠传输。图 17(c)为负载功率和整流器 1 输入功率。其中, P_L 为负载功率, P_{r1} 为整流器 1 输入功率。可以看出,0.5 s 前,系统正常工作时,由交直交系统为负载提供能量,整流器 1 为负载提供一半的功率,因此输入功率约为负载功率的一半。0.5 s 时整流器 1 故障,退出运行,由整流器 1 和整流器 2 组成的背靠背系统补偿一半的负载功率,使 Scott 牵引变压器两供电臂输出相等的功率,解决电网侧的负序电流问题,实现电网侧三相电流平衡。故障前后整流器 1 输入电流的大小相等,方向相反,因此故障前后整流器 1 输入功率方向相反。

3.2 对比仿真

根据图 6 建立仿真模型。其中,三相-两相牵引变压器采用 Scott 牵引变压器。正常运行时,由整流器和逆变器组成的交直交功率变换系统为牵引网供电。故障工况时,切换至传统牵引供电方式,由 Scott 牵引变压器为牵引网供电。左臂和右

臂负载分别为 $80\ \Omega$ 和 $120\ \Omega$ 。0.5 s 前,系统正常运行。0.5 s 时,逆变器故障,退出运行,切换为传统供电方式,由牵引变压器为牵引负载供电。仿真结果如图 18 所示。

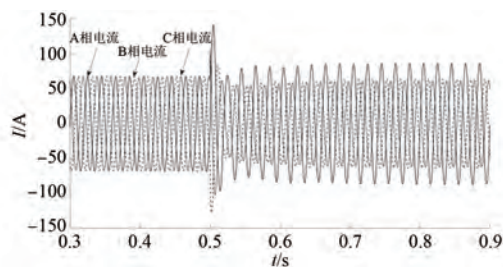


图 18 对比仿真结果

从图 18 中可以看出,系统正常运行时,网侧三相电流对称,正弦度好,实现了电能质量的综合治理。0.5 s 时,逆变器故障,切换为传统牵引供电方式。网侧三相电流出现了明显的不平衡现象,负序电流无法得到治理。因此,通过和 3.1 节的对比可以看出,本文所提方案的容错性能更强,具有更明显的优势。

4 结 语

本文提出了一种适应性强、容错性能好的交直交牵引变电所方案,并进行了理论研究与仿真验证,得出以下结论。

(1) 正常运行时,本文所提方案和现有交直交牵引变电所方案均可实现电气化铁路电能质量问题的综合治理,并具有取消分相区的能力。本文所提方案继承了现有交直交牵引变电所方案的优势。

(2) 对比现有交直交牵引变电所方案和本文所提方案的主电路结构可以看出,本文所提方案只需在传统牵引变电所的基础上添加交直交系统,而现有方案需新建牵引变电所,若考虑备用,还需保留传统牵引供电模式。因此,本文所提方案的改造难度小、成本低、适应性强,弥补了现有方案的缺陷。

(3) 通过对比仿真可以看出,现有方案在整流器或逆变器故障退出运行后,需切换为传统供电方式,无法解决电能质量问题。而本文所提方案在任一整流器或逆变器故障退出运行后,通过运行方式的切换,仍可实现电能质量问题的综合

治理,可靠性强,容错性能好。

【参考文献】

- [1] 罗培,陈跃辉,罗隆福,等. 铁路电能质量控制系统容量优化设计[J]. 电工技术学报,2016,31(8): 181.
- [2] 唐宏伟,唐杰,林立. 基于 YNVD 平衡变压器的电气化铁路电能质量管理系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(10): 197.
- [3] 王雅婷. 电气化铁路组合式同相供电经济性分析[J]. 铁道机车车辆,2018,38(2): 36.
- [4] SHU Z L, XIE S F, LU K, et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application[J]. IEEE Transaction on Power Electron,2013,60(5): 1831.
- [5] SHU Z L, XIE S F, LI Q Z. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Transaction Power Electron,2011,26(2): 334.
- [6] 李子欣,张航,雷鸣,等. 基于电力电子变压器的新型贯通式同相供电变流器[J]. 电工电能新技术,2018,37(5): 1.
- [7] 闫晗,舒泽亮,姚家焯,等. 基于三相-单相电力电子变压器的牵引供电系统负载不平衡、无功和谐波潮流分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(11): 159.
- [8] 常非. 新型牵引供电系统交直交变电所的 PET 结构研究[J]. 国网技术学院学报,2019,22(6): 1.
- [9] 常非,杨中平,林飞. 基于 MMC 的新型牵引供电系统研究(一)[J]. 铁道学报,2016,38(12): 41.
- [10] 常非,杨中平,林飞. 基于 MMC 的新型牵引供电系统研究(二)[J]. 铁道学报,2017,39(2): 39.
- [11] WU S, WU M L, WANG Y. A novel co-phase power-supply system based on modular multilevel converter for high-speed railway AT traction power-supply system[J]. Energies,2021,14(1): 253.
- [5] 宿泽达. 真空干泵用磁通切换电动机设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2021.
- [6] 韩雪秋,安跃军,安辉,等. 真空干泵驱动电机冷却效果分析[J]. 电机与控制应用,2021,48(6): 69.
- [7] 胡鑫,安跃军,杨维国,等. 基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机冷却系统分析[J]. 电机与控制应用,2020,47(2): 80.
- [8] 易龙芳,盛建明,顾菊平,等. 定子永磁型双凸极电机转子设计[J]. 微电机,2009,42(10): 12.
- [9] ZHU S, CHENG M, DONG J, et al. Core loss analysis and calculation of stator permanent-magnet machine considering DC-biased magnetic induction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(10): 5203.
- [10] 安跃军,张振厚,张强,等. 干式涡旋真空泵用特种电机温度场仿真与实验[J]. 电机与控制学报,2017,21(8): 48.
- [11] 安跃军,张强,李文瑞,等. 新型移相式屏蔽电动机屏蔽套涡流与温升分析[J]. 西安交通大学学报,2014,48(6): 50.
- [12] 殷福久. 半导体装备用真空泵屏蔽电动机设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [13] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] XU X, ZHANG G, LI G, et al. Performance analysis and temperature field study of IPMSM for electric vehicles based on winding transformation strategy[J]. IET Electric Power Applications,2020,14(7): 1186.
- [15] DU G, XU W, ZHU J, et al. Power loss and thermal analysis for high power high speed permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(4): 2722.
- [16] 王宝. 真空干泵驱动用定子永磁型无刷电机设计与性能分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2021.

(上接第 70 页)