

一种新型同相牵引供电系统均流性能研究

何晓琼, 彭 旭, 周瑛英, 王 远, 舒泽亮, 肖 建

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 研究基于三相-单相变换器的同相牵引供电系统的均流性能。该系统可以完全取消牵引网电分相装置, 在牵引网和电网间可以直接进行有功传递, 极大改善了电能质量, 是一种理想的同相牵引供电系统。建立了该系统的两变电所并网模型与牵引网阻抗模型, 分析了系统环流特性和下垂特性, 得出该系统具有下垂特性, 可以运用下垂控制实现多个变换器并联运行, 并实现系统均流控制, 在此基础上给出了该系统的并网控制方法。仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 三相-单相变换器; 同相牵引供电系统; 环流特性; 下垂特性; 下垂控制

中图分类号: TM 922.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.010

0 引言

牵引供电系统是电气化铁道的重要组成部分, 承担着向电力机车提供能量的任务。目前, 绝大多数国家均采用三相-两相分相供电模式, 由于电气铁道接触网采用单相交流制, 如果仅从电力系统单相取电将造成电力系统的不对称而使三相电压不平衡, 因此现行牵引供电系统设置了电分相。由于电分相装置的存在, 机车运行速度和承载能力受到限制, 严重制约着高速重载铁路发展。为保证电力系统三相负荷对称性, 提升机车运行速度和承载能力, 世界各国对牵引供电模式开展了诸多研究^[1-10]。

自文献[1]提出牵引网全线贯通供电以来, 诸多学者对其系统架构展开了研究。本文研究一种基于三相-单相变换器的贯通式同相牵引供电系统^[7], 该系统利用电力电子变流技术实现牵引网的贯通并网与柔性可控, 可彻底取消牵引网电分相装置, 能极大改善三相电网的电能质量。针对多个电压源模块的并网控制, 最主流的控制方法有主从控制法和外特性下垂控制法^[11]。本文研究的系统中各变电所之间不存在主从关系, 因此, 主从控制方法不适合于本系统。

本文建立了基于三相-单相变换器的贯通式同相牵引供电系统两变电所模型, 分析了系统环流阻抗和下垂特性, 设计了下垂控制策略, 仿真验证了利用下垂控制进行变换器并网控制在该系统的可行性。

1 贯通式同相牵引供电系统结构

图 1 左半部分是现行牵引供电系统, 变电所从三

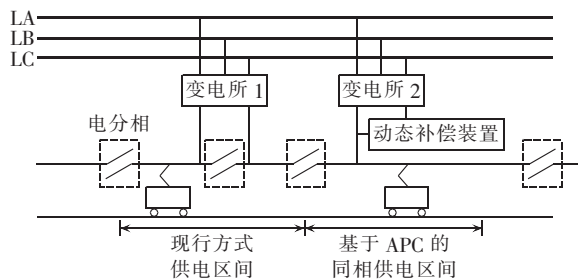


图 1 现行分相供电系统与同相供电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of present split-phase power supply system and co-phase power supply system

相电网向牵引网提供两相供电, 为了保持系统功率平衡以及提高功率利用率, 机车需要电分相。一方面, 电分相会引起牵引网远端电压明显下降, 所引起的谐波、无功以及三相不平衡电流会对电网产生巨大冲击; 另一方面, 电分相会使机车不能连续受流, 造成机车速度以及牵引功率的巨大损失^[12]。

基于既有线路改造的同相牵引供电系统已在四川眉山投入试运行, 见图 1 右半部分。该系统通过 Ynvd 平衡变压器将三相变为两相。一相提供牵引功率, 另一相连接动态补偿装置, 为无功及单相负载电流谐波提供补偿, 同时提供一半的有功功率。但是由于动态补偿装置连接到变压器次边的两相输出对于供电臂间的相位没有影响, 因此系统难以实现贯通供电^[13-14]。

基于三相-单相变换器的贯通式同相牵引供电系统如图 2 所示, 三相-单相变换器结构如图 3 所示。

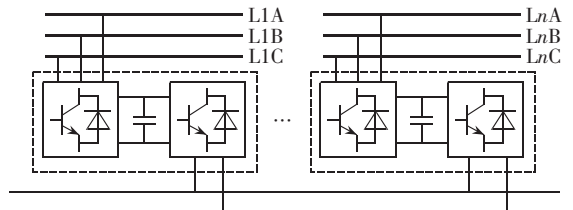


图 2 贯通式同相牵引供电系统模型

Fig.2 Model of advanced co-phase traction power supply system

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177139); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(A0920502051202-28); 牵引动力国家重点实验室开放课题项目(TPL1313)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177139), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(A0920502051202-28) and the Traction Power State Key Laboratory Open Issue(TPL1313)

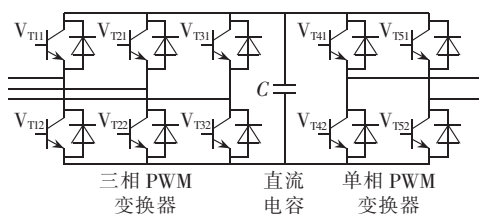


图 3 三相-单相变换器结构

Fig.3 Structure of three-phase to single-phase converter

该系统通过有源功率变换器实现功率在三相电网和牵引网之间直接传递,通过三相-单相变换器,可获得幅值/相位相等的单相交流电,并对无功、谐波进行补偿,同时平衡分配三相-单相系统的有功电流,机车可以在该系统任何位置受流。牵引网可以完全取消电分相,系统可以真正实现贯通供电,并能极大改善电能质量^[7-8,13]。

2 牵引网阻抗计算

牵引网是牵引系统的重要组成部分,由接触网、铁轨及大地构成回路,贯通式同相牵引供电系统的接触网与现有铁路模型一致。因此,对该系统牵引网的分析可以参照现行牵引网阻抗分布分析进行。牵引网上工频电压频率较低,且占主导地位,但考虑动车在线路运行中产生的高次谐波问题,在牵引网阻抗的计算中,等效电容和电感的影响不可忽略。

根据图 4 牵引网电路最简模型^[15],图中 z_1 为接触网-地回路自阻抗, z_2 为轨-地回路自阻抗, U 为输出电压, U' 为机车负载电压,可以得出回路电压方程如下:

$$U - U' = (z_1 I - z_{12} I_1 + z_2 I_1 - z_{12} I) l = \left(z_1 - z_{12} \frac{z_{12}}{z_2} + z_2 \frac{z_{12}}{z_2} - z_{12} \right) I l = \left(z_1 - \frac{z_{12}^2}{z_2} \right) I l \quad (1)$$

则牵引网单位长度阻抗为:

$$z = \frac{U - U'}{I l} = z_1 - \frac{z_{12}^2}{z_2} \quad (2)$$

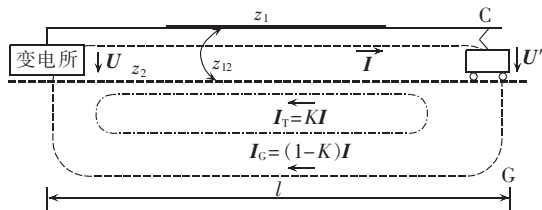


图 4 牵引网电路最简模型

Fig.4 Simplest model of traction network circuit

选取单线有加强全补偿链形悬挂,导线型号 LJ-70+LGJ-185+GLCA-100/215,钢轨规格为 50 kg/km。查阅相关参数^[16],计算得接触网-地回路自阻抗为 $0.136 + j0.56 \Omega/\text{km}$,轨-地回路自阻抗为 $0.198 + j0.56 \Omega/\text{km}$,互阻抗为 $0.05 + j0.312 \Omega/\text{km}$,牵引网单位长度阻抗为 $0.14 + j0.309 \Omega/\text{km}$ 。

3 系统环流分析

贯通式同相牵引供电系统虽然极大改善了电能质量,取消了电分相装置,却带来了新的问题。由于系统实现了贯通,各变电所并联运行,而各变电所参数及运行情况存在差异,因此变电所之间会出现环流。过大的环流不仅对负载没有贡献,反而会增加系统负担,甚至损坏设备,因此有必要对该系统的环流加以分析。

将变电所等效为电源,简化的两变电所并联回路如图 5 所示。其中, $U_{1,2}$ 是电源输出电压幅值; $\varphi_{1,2}$ 是电源输出电压相位; U_0 是负载电压幅值,其中负载相位在文中定义为 0° ; $X_{1,2}$ 是变电所等效输出感抗; $R_{1,2}$ 是变电所等效输出电阻; $Z'_{1,2}$ 是牵引网等效输出阻抗; Z_L 是负载,即运行的机车; $I_{1,2}$ 是两电源输出电流。

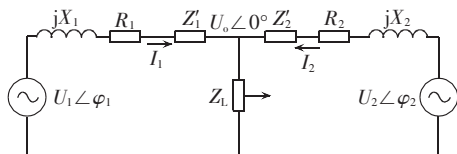


图 5 两变电所并联模型

Fig.5 Model of two substations connected in parallel

为简化分析过程,假设 $\varphi_1 = \varphi_2$, $R_1 = R_2$, $X_1 = X_2$, 定义环流为 I_H ,根据图 5,有:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + Z'_1 \quad (3)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 + Z'_2 \quad (4)$$

$$U_1 - Z_1 I_1 = U_2 - Z_2 I_2 = (I_1 + I_2) Z_L = U_0 \quad (5)$$

$$I_H = I_1 - I_2 \quad (6)$$

由于机车的运动造成 $Z'_{1,2}$ 的变化,设 z' 是牵引网单位长度等效输出阻抗, D 是机车与左侧变电所距离,两变电所相距 50 km,得:

$$Z'_1 = z' D, \quad Z'_2 = z' (50 - D) \quad (7)$$

所以:

$$Z_1 \neq Z_2 \quad (8)$$

因此环流阻抗中的负载阻抗不能忽略,根据式 (3)~(8),可得 $I_{1,2}$ 及 I_H 的表达式分别为:

$$I_1 = \frac{(U_1 - U_2) Z_L + Z_2 U_1}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (9)$$

$$I_2 = \frac{(U_2 - U_1) Z_L + Z_1 U_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (10)$$

$$I_H = \frac{2(U_1 - U_2) Z_L + Z_2 U_1 - Z_1 U_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (11)$$

根据上述计算结果,取机车为恒阻抗模型^[17], $Z_L = 62.5 + j46.875 \Omega$ 。计算环流 I_H 随距离 D 变化趋势如图 6 所示。

当 D 在 $[0, 50]$ 区间变化时,由图 6 可见:当 $D = 25 \text{ km}$ 时,图形出现拐点,此时, $Z_1 = Z_2 = Z$,式 (11) 可化简为:

$$I_H = \frac{U_1 - U_2}{Z} \quad (12)$$

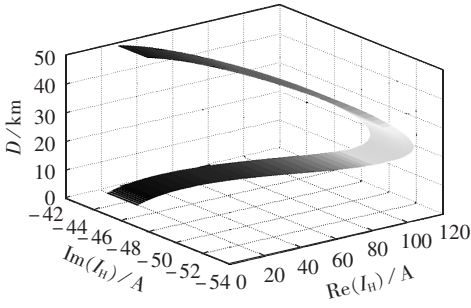


图 6 环流随 D 变化趋势

Fig.6 Variation trend of circulation along with D

通过以上分析和图 6 可知,贯通式同相牵引供电系统多机并联运行时的环流不可忽略。

4 下垂特性分析及均流控制器设计

本系统多变电所并联运行等同于多个电源模块的并联运行,各模块由于参数不完全一致,使得其输出不同,有的甚至不输出,导致电流分配不均,引起环流,使部分模块开关应力过大,造成设备损坏,最终使系统可靠性降低。均流控制就是要采用合适的控制策略合理分配负载电流给各变电所,同时使输出电压符合系统要求,保证系统稳定工作。

4.1 系统下垂外特性分析

根据外特性下垂控制原理,下垂控制法的使用要求系统具有下垂外特性^[11,18]。本系统与一般电力系统所不同的是负载在两电源之间运动,负载与两侧变电所之间阻抗动态变化,该系统是否具有下垂外特性,需要进行具体分析。

根据图 5 及式(3)~(8)计算可得该系统变电所输出功率如下:

$$P_n = U_o \frac{(R+R_n)(U_n \cos \varphi_n - U_o) + (X+X_n)U_n \sin \varphi_n}{(R+R_n)^2 + (X+X_n)^2} \quad (13)$$

$$Q_n = -U_o \frac{(R+R_n)U_n \sin \varphi_n + (X+X_n)(U_o - U_n \cos \varphi_n)}{(R+R_n)^2 + (X+X_n)^2} \quad (14)$$

其中, R_n 为 Z_n 实部; X_n 为 Z_n 虚部; $n=1,2$ 。

联立式(13)、(14)可得:

$$U_n \cos \varphi_n - U_o = \frac{(R+R_n)P_n + (X+X_n)Q_n}{U_o} \quad (15)$$

$$U_n \sin \varphi_n = \frac{(X+X_n)P_n - (R+R_n)Q_n}{U_o} \quad (16)$$

由第 2 节可知牵引网的阻抗通常较小,牵引网传输线对系统电压相位差影响较小,有 $\sin \varphi_n \approx \varphi_n$ 、 $\cos \varphi_n \approx 1$ 。因此,式(15)和(16)可简化为:

$$U_n - U_o = \frac{(R+R_n)P_n + (X+X_n)Q_n}{U_o} \quad (17)$$

$$\varphi_n = \frac{(X+X_n)P_n - (R+R_n)Q_n}{U_n U_o} \quad (18)$$

另外,牵引网阻抗中电抗数倍于电阻,因此变电所输出无功功率 Q_n 对负载电压 U_o 与变电所电压 U_n 的幅值差影响较大,变电所输出有功功率 P_n 对负载

电压 U_o 与变电所电压 U_n 的相角差 φ_n 影响较大。代入相关参数,可得贯通式同相牵引供电系统的有功与相角、无功与电压幅值变化量关系分别如图 7、图 8 所示。可以看出,有功功率与相角的变化量、无功功率与输出电压幅值变化量近似成正比关系,当机车位置固定时,斜率基本为一负常数,且随着机车位置的移动,斜率始终为负,系统整体上具有下垂外特性。

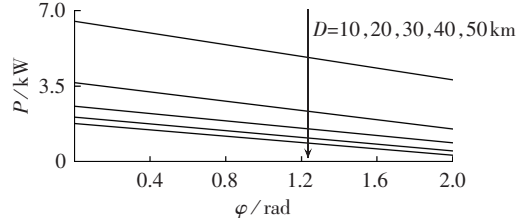


图 7 P - φ 曲线

Fig.7 Curves of P - φ

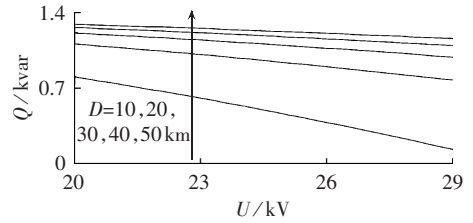


图 8 Q - U 曲线

Fig.8 Curves of Q - U

4.2 均流控制器设计

根据前述系统下垂特性,建立图 9 所示的牵引网侧有功、无功的均流算法。该算法的前提条件是系统中各个变电所的电压频率与幅值无较大差异。而该前提条件在当前变电所接入的工业电网端口较易满足。

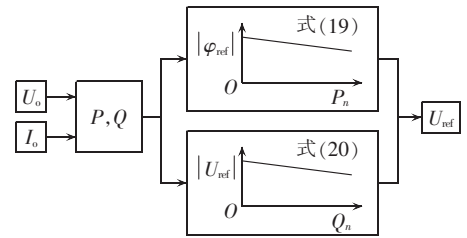


图 9 下垂控制框图

Fig.9 Block diagram of droop control

由式(13)和(14)推导出下垂控制公式如下^[19]:

$$\varphi_{ref} = \varphi_{n0} - m_n P_n \quad (19)$$

$$U_{ref} = U_{n0} - k_n Q_n \quad (20)$$

其中, φ_{ref} 、 U_{ref} 分别为输出电压相位与幅值的参考值; φ_{n0} 、 U_{n0} 分别为变电所输出电压初始相位与初始幅值; k_n 、 m_n 为下垂系数,主要与系统输出功率有关。由于两变电所间同一时刻一般只有一列机车,且机车运行基本不影响变电所输出功率,因此本系统的输出功率变化很小。综合考虑均流效果及动态响应,选 k_n 、 m_n 为固定值进行下垂控制设计。

通过检测变电所输出电压和电流,计算出 P_n 和 Q_n ,根据各变电所有功与无功的变化,由式(19)和(20)得到给定电压相角和幅值,通过对输出电压的相角和幅值的控制,实现下垂控制,从而对环流进行有效抑制以达到均流效果。

5 仿真系统及仿真分析

5.1 仿真系统与仿真参数

贯通式同相牵引供电系统理论上可以由任意多个变电所组成。两变电所模型已可以研究该系统的绝大多数工况下的性能。因此根据下垂控制理论建立图 10 所示的两变电所仿真系统架构图。

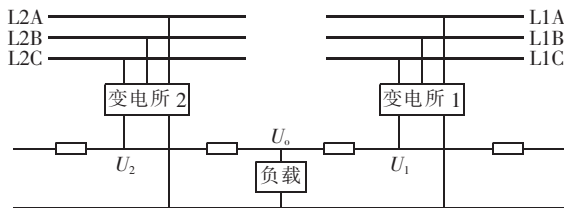


图 10 两变电所仿真系统
Fig.10 Dual-substation simulation system

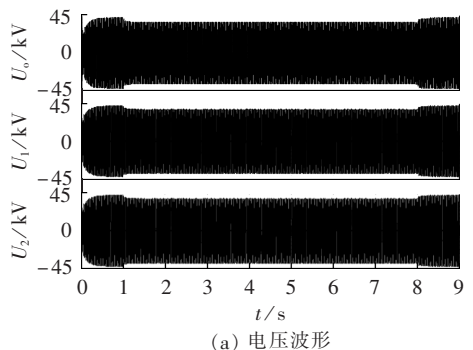
图 10 中变电所 1 和 2 为三相-单相变换器的贯通式同相牵引变电所,变电所由理想变压器、三相-单相变换器组成。系统电压设定为 25 kV;模拟实际情况,设两变电所初始相位差为 5.73° ,初始幅值给定相差 250 V;两变电所间设置模拟牵引负载,由于机车(特别是动车)运行时无功很小,根据牵引负荷功率推算,取负载为 $168\ \Omega$;各变电所与负载之间的牵引网简化为 T 型等效电路,等效电阻 $0.2568\ \Omega/\text{km}$ 、电感 $0.002\ \text{H}/\text{km}$ 、电容 $8.6\ \text{nF}/\text{km}$;根据工程实际,设两变电所相距 50 km。

模拟系统运行过程:0 s 时,变电所 1 投入运行,系统空载;0.2 s 时,变电所 2 投入,与变电所 1 并网运行,系统空载;1 s 时,负载在距离两变电所均为 25 km 处投入;5 s 时,由于机车在此期间发生位移,负载两侧线路阻抗发生变化,负载位移设定为 500 m;8 s 时,负载离开,等效为被切除。

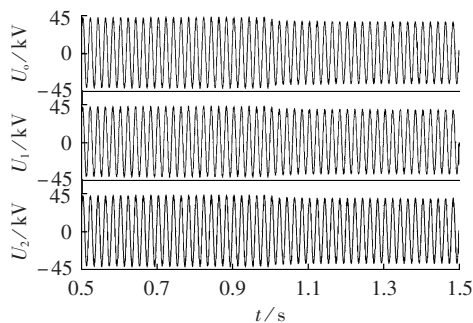
5.2 仿真结果及分析

图 11 是机车受流处电压 U_0 、变电所 1 输出电压 U_1 与变电所 2 输出电压 U_2 波形,两变电所设计为电压源模型,由图可知 U_0 有效值始终在牵引网规定的电压范围内变动。图 12 是负载电流、变电所 1 输出电流、变电所 2 输出电流以及上述两变电所之间的环流波形。由图 12 可知,在 0.2 s 前,只有变电所 1 空载,所以不存在环流问题;0.2 s 时变电所 2 投入,虽然没有向牵引负载供电,但由于两变电所之间存在初始值的差异,造成瞬时的环流很大,达到 50 A 左右,由于系统加入了下垂控制,环流迅速被抑制在 2 A 左

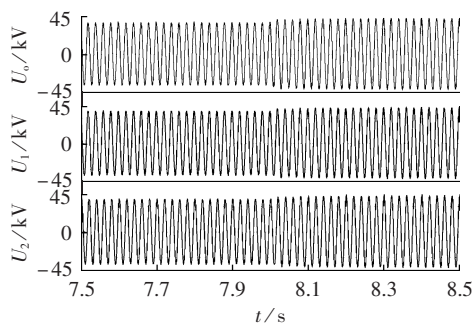
右;在 1 s 时,两变电所电流相位、幅值已基本被调整一致,此时投入牵引负载,两变电所间已基本不存在环流,阻性牵引阻抗使得输出电流幅值在 2~8 s 几乎保持不变;5 s 时,机车移动 500 m 引起系统阻抗值的变化,从而产生环流,然而环流较小,仅 17 A,并且也很快被抑制在 2 A 左右。可见变换器能够根据负



(a) 电压波形

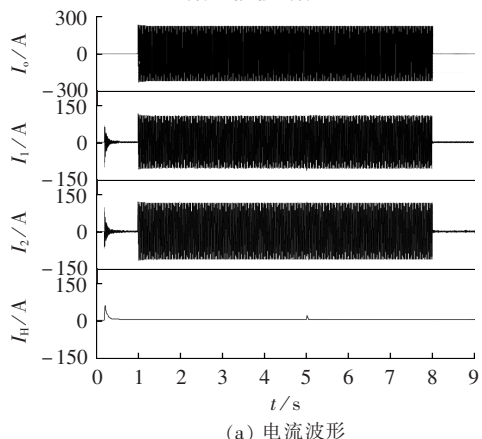


(b) 局部放大波形



(c) 局部放大波形

图 11 负载、变电所 1 和 2 的输出电压波形
Fig.11 Voltage waveforms of load, substation No.1 and No.2



(a) 电流波形

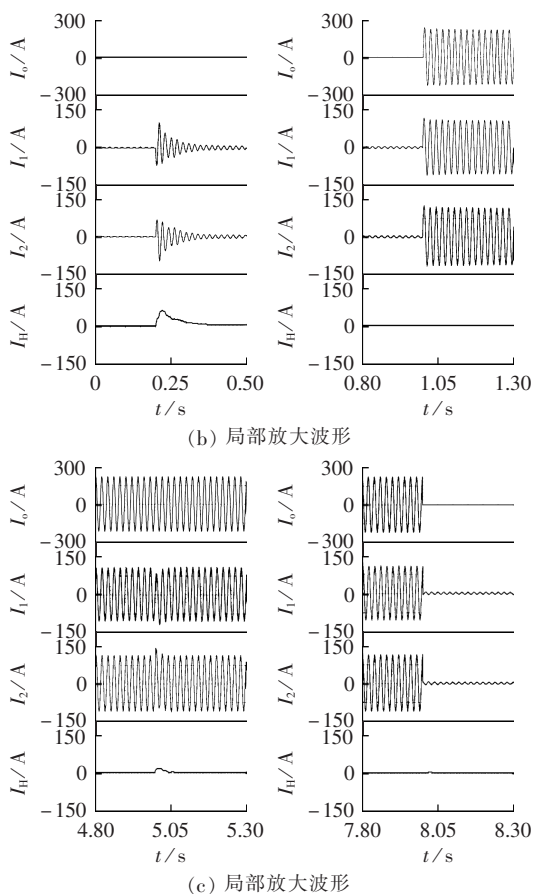


图12 负载、变电所1和2的电流与系统环流波形
Fig.12 Current waveforms of load,substation
No.1 & No.2 and circulation

载与线路阻抗自动分配电流大小,系统可以实现均流。

6 结论

本文针对现行牵引供电系统存在的缺陷,研究了一种基于三相-单相变换器的贯通式同相牵引供电系统,分析了系统阻抗、环流和下垂特性,讨论了均流控制方法,计算得出了系统牵引阻抗,得到该系统环流分布特性,得出该系统具有下垂外特性,并设计了下垂控制策略。本文利用 MATLAB/Simulink 建立了两变电所贯通式同相牵引供电系统模型,通过仿真验证了该系统可根据负载和线路阻抗分布特征,通过下垂控制使系统实现均流。

参考文献:

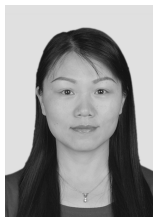
- [1] 李群湛,张进思,贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报,1988,4(10):24-31.
LI Qunzhan,ZHANG Jinsi,HE Weijun. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction[J]. Journal of the China Railway Society,1988,4(10):24-31.
- [2] 王科,周峰,陈建业,等. 能量融通型 STATCOM 提高牵引变电站供电能力研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):44-49.
WANG Ke,ZHOU Feng,CHEN Jianye,et al. Capacity improvement based on power accommodation STATCOM for traction

- power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):44-49.
- [3] 张友鹏,董海燕. 基于 Y/△平衡变压器的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):101-104.
ZHANG Youpeng,DONG Haiyan. Co-phase traction power supply system based on Y/△ balanced transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):101-104.
- [4] 张秀峰,高仕斌,钱清泉,等. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报,2006,28(4):32-37.
ZHANG Xiufeng,GAO Shibin,QIAN Qingquan,et al. A novel cophase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode[J]. Journal of the China Railway Society,2006,28(4):32-37.
- [5] 吴萍,李群湛. 基于 YN-vd 接线变压器的新型同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):87-91.
WU Ping,LI Qunzhan. Cophase traction power supply system based on YN-vd connection transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):87-91.
- [6] 张刚毅,李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转换[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):142-145.
ZHANG Gangyi,LI Qunzhan. Transfer from out-phase power supply to in-phase power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):142-145.
- [7] SHU Z L,XIE X F,JING Y Z. Advanced co-phase traction power supply simulation based on multilevel converter[C]//Proceedings of the 2011 2nd International Congress on Computer Applications and Computational Science Advances in Intelligent and Soft Computing,CACS2011. Bali,Indonesia:[s.n.],2012:459-465.
- [8] HE X Q,WANG Y,SHU Z L,et al. Multiple AC-DC-AC substations traction power supply system simulation[C]//2012 IET International Conference on Information Science and Control Engineering. Shenzhen,China:[s.n.],2012:294-297.
- [9] CHEN S L,LI R J,HIS P H. Traction system unbalance problem-analysis methodologies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1877-1883.
- [10] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2006:16-30.
- [11] 王鹏,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG Peng,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.
- [12] 李群湛. 三相牵引变电所不可调补偿的综合分析[J]. 铁道学报,1987,9(1):9-17.
LI Qunzhan. A comprehensive analysis on fixed parallel compensation used in 3-phase traction substations[J]. Journal of the China Railway Society,1987,9(1):9-17.
- [13] 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 Transactions on Power Electronics,2011,26(2):334-343.
- [14] 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 Transactions on Industrial Electronics,2013,60(5):1831-1839.
- [15] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学

出版社,2007:69-101.

- [16] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 电气化铁道设计手册——牵引供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1987:25-34.
- [17] 李欣然,张广东,朱湘有,等. 牵引供电系统综合负荷模型结构[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):71-75,95.
- LI Xinran,ZHANG Guangdong,ZHU Xiangyou,et al. A load model of traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(16):71-75,95.
- [18] SANTOS FILHO R M,SEIXAS P F,CORTIZO P C,et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008,55(8):2923-2932.
- [19] 谢孟. 单相400 Hz中频电压源逆变器的输出控制及其并联运行控制[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- XIE Meng. Output control and parallel operation control of single-phase 400 Hz medium frequency voltage-source inverters [D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Science, 2006.

作者简介:



何晓琼

何晓琼(1974-),女,重庆人,副教授,博士研究生,主要从事电力电子技术及应用、电能变换与控制、轨道交通电气化与自动化等研究工作(E-mail:jony8668@163.com);

彭旭(1987-),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为轨道交通电气化与自动化;

周瑛英(1989-),女,浙江台州人,硕士研究生,研究方向为电力电子控制技术;

王远(1987-),男,山西太原人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动;

舒泽亮(1979-),男,四川德阳人,副教授,博士,主要从事电力电子技术及应用研究,包括APF、STATCOM、PWM整流器及电力电子应用中的控制与数字信号处理;

肖建(1950-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电气工程和电气工程等相关领域研究。

Current-sharing performance of advanced co-phase traction power supply system

HE Xiaoqiong,PENG Xu,ZHOU Yingying,WANG Yuan,SHU Zeliang,XIAO Jian

(School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

Abstract: The current-sharing performance of an ideal co-phase traction power supply system is studied, which,based on the three-phase to single-phase converter,transfers directly the active power between power grid and traction network to completely cancel the neutral-section device and greatly improve the quality of electric energy. Its dual-substation model and traction network impedance model are established and its circulation and droop characteristics are analyzed,which shows that,with the droop external characteristic,the parallel operation of multiple converters can be implemented by the droop control to achieve the current sharing. The method of grid-connection control is given and the simulative results demonstrate the correctness of theoretical analysis.

Key words: three-phase to single-phase converter; co-phase traction power supply system; circulation characteristic; droop characteristic; droop control

(上接第52页 continued from page 52)

Magnetization curve fitting in field-circuit coupling computation for DC-biased transformer

PAN Chao¹,WANG Mengchun¹,CAI Guowei¹,JIANG Yanjin²,LI Tiefeng²

(1. School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132021,China;

2. Jilin Electric Power Supply Company,Jilin 132001,China)

Abstract: An improved method of saturated magnetization curve fitting based on piecewise function is proposed to solve three-dimensional magnetic field with edge finite element,which considers the nonlinearity of unsaturated magnetization. The transient current and the dynamic inductance of single-phase transformer with DC-bias are computed based on the time-domain field-circuit coupling model,and their variation rule and corresponding relationship are analyzed. Different fitting methods for DC-bias computation are discussed and the impact of the nonlinearity of unsaturated magnetization on the coupling parameters and volt-ampere characteristics is analyzed. The accuracy and validity of the proposed method are verified by the comparison with the experimental data.

Key words: electric transformers; DC bias; magnetizing characteristics; time-domain field-circuit coupling; edge finite element; calculations