

牵引变电所短时并网倒闸技术

孙文静¹,王 科¹,胡海涛¹,陈劲草²,何正友¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031;2. 中国铁路上海局集团公司 高铁运维技术中心,上海 200071)

摘要:针对现行牵引变电所倒闸操作存在的供电中断、耗时长等缺陷,探讨了牵引变电所短时并网倒闸的可行性及技术条件。结合牵引供电系统的运行机理和拓扑结构,搭建了Simulink仿真模型,分析了系统并网运行过程中的电流特性。阐述了并网倒闸现场实施流程,并对比分析了现场测试结果与仿真结果,验证了并网倒闸方案的可实施性及仿真模型的精确性。在此基础上,建立了牵引变电所并网运行等效模型,分析了并网时系统电流的计算方法,并应用敏感度指标探明了其关键影响因素。分析结果表明,2路进线电源的电压幅值差是最关键因素,且当2路进线电源的电压偏差满足国家电压偏差标准时,短时并网产生的电流不会影响系统的安全运行。最后,归纳了并网倒闸的技术条件,为牵引变电所并网倒闸的工程应用提供理论和技术支撑。

关键词:牵引变电所;短时并网倒闸;电流特性;现场试验;技术条件

中图分类号:TM 922.4

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005018

0 引言

电气设备状态主要包括运行、备用(冷备用及热备用)、检修3种。将电气设备从一种状态转换为另一种状态的过程叫倒闸,所进行的操作叫做倒闸操作^[1]。牵引变电所主变压器及进线电源倒闸操作是保障牵引供电系统安全稳定运行的重要举措^[2]。据统计,正常运行情况下一座牵引变电所一年需倒闸牵引变压器4次,若考虑电力系统或牵引变电所的供电设备发生故障需要紧急切换电源等特殊情况下,倒闸次数将高达8~10次。在实际运营过程中,牵引变电所实施倒闸的场景可归纳为如下3类。

(1)检修类:《牵引变电所运行检修规程》规定了牵引变电所的高压设备应按照大、中、小修的周期进行停电检修。此外,牵引变电所的电源线路和电网公司管辖的电源侧变电所每年都需要按照计划进行停电检修。

(2)故障类:当电网公司管辖的供电设备或者牵引变电所的供电设备发生故障时,需要及时进行现场倒闸。

(3)其他类:牵引供电系统采用一主一备的供电方式,为确保供电的可靠性,需要定期地进行电源倒闸,以验证备用系统的可用性。此外,牵引变电所的备用系统需要定期运行,防止主变压器长期不带电导致线圈受潮。

然而,现行的牵引变电所倒闸操作主要存在如下4个方面的缺陷。

(1)造成供电中断:牵引变电所主变压器及进线均采用冷倒的方式,即一路电源停电后,另一路电源手动或自动投入,将导致供电系统短时停电。

(2)耗时长:若牵引供电系统发生故障,需要进行临时倒闸。其实施过程如下:首先,供电调度根据设备故障情况向行车调度提出停电申请;然后,行车调度临时调整车流并办理停扣列车等相关手续;最后,倒闸完成后,行车调度重新安排列车开行。按照每次停电操作的时间为5 min测算,影响运输时间超过30 min。

(3)人力、物力浪费:按月度施工计划进行倒闸实施过程中,在计划约定的时间往往不能准时进行倒闸,设备管理单位现场配合人员要等候较长时间,造成了人力和物力资源的严重浪费。

(4)枢纽所倒闸困难:枢纽地区的牵引变电所具有供电单元多、车流运行复杂、天窗时间少等特殊性质^[3],造成枢纽地区的牵引变电所倒闸兑现率低(仅有20%左右)。如上海南翔、南京东、徐州北、虹桥、南京南等大型枢纽牵引变电所常年无法进行倒闸。造成供电设备不能进行定期检修维护,存在严重的安全隐患。

针对传统倒闸操作存在的不足,文献[4-5]通过分析高速铁路10 kV电力贯通线短时并网倒闸时系统的电流特性,探讨了并网倒闸的技术条件及可行性。并网倒闸具有不断电、耗时短、实施过程简单、灵活性高等优势,可极大地减少人力、物力的消耗。然而,并网倒闸过程必须满足一定的技术条件,否则易造成并网电流过大、继电保护动作、电网解列等隐患故障。

因此,本文将结合牵引供电系统的运行机理和

收稿日期:2019-10-16;修回日期:2020-03-19

基金项目:上海铁路局科研开发计划项目(JS15-004)

Project supported by the Research and Development Plan of Shanghai Railway Bureau(JS15-004)

拓扑结构,搭建精确的牵引变电所并网倒闸仿真模型,分析并网运行过程中系统的电流波动特性。然后,结合现场试验流程,制定完备的牵引变电所并网倒闸实施方案,并将现场测试 results 和仿真分析结果进行对比分析,以验证并网倒闸方案的可行性和仿真模型的准确性。最后,对影响系统并网电流的关键因素进行分析,并制定完备的并网倒闸技术条件。

1 牵引供电系统短时并网电流分析

1.1 牵引供电系统供电方式

牵引供电系统是电力机车从电力系统获取电能的重要通道,主要由牵引变电所和牵引网两部分构成。其中,牵引变电所是整个系统的枢纽,将 110 kV 或 220 kV 三相交流电转换为满足电力机车运行的 27.5 kV 单相交流电。

附录中图 A1 为某高速铁路牵引变电所的主接线示意图,主要包括进线电缆、牵引变压器、27.5 kV 母线、馈线电缆、高/低压侧断路器、互感器等电气设备。电力牵引作为一级负荷,为保证其供电的可靠性,牵引变电所由 2 路独立电源供电,当任一路故障时,另一路仍然能正常供电^[6]。其中,2 路电源可来自不同的地区变电所或同一地区变电所的不同母线。因而,牵引变电所通常包含 2 套完备的电源供应及转换装置。正常运行工况下,一套设备投入使用,而另一套设备运行在热备用状态。

由于 2 路电源进线的电压、供电设备参数等存在一定的偏差,当牵引供电系统 2 路进线电源并网运行时,系统会产生一定的并网电流。过大的电流易导致供电设备绝缘损坏、电力系统保护动作等危害^[7]。因此,论证并网倒闸可行性的关键在于评估并网运行后系统的电流特性是否会影响系统的安全稳定运行。

1.2 并网电流分析

根据图 A1 所示牵引供电系统的拓扑结构,基于 MATLAB / Simulink 仿真平台,搭建如附录中图 A2 所示的牵引供电系统并网运行仿真模型^[8-11]。表 1 为某牵引供电系统网络参数,设定在 0.15 s 实现并网运行。

图 1 为空载运行条件下牵引供电系统实现并网运行过程中三相高压侧、27.5 kV 母线侧电流波形变化趋势。图 1(b)中 Ta、Fa、Tb、Fb 分别表示 27.5 kV 侧 α 相 T 母线、F 母线和 β 相 T 母线、F 母线。从图 1 中可以看出:

(1)并网前,三相高压侧存在较小的电流(有效值分别为 0.58、1、0.58 A),这是牵引变压器空载损耗

表 1 牵引供电系统电气参数

Table 1 Electrical parameters of traction power supply system

电气设备	参数	数值
进线电源	短路容量 / (GV·A)	14.71 / 9.62
	额定电压 / kV	220
输电线路	单位长度电阻 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.13
	单位长度电抗 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.35
	长度 / km	2.65
牵引变压器	额定电压 / kV	220 / 2×27.5
	额定容量 / (MV·A)	31.5
	短路电压百分比 / %	10.52 / 10.60 / 10.52 / 10.56
	短路损耗功率 / kW	99.71 / 99.42 / 99.80 / 99.98
	空载电流百分比 / %	0.22 / 0.17 / 0.17 / 0.17
牵引母线	空载损耗功率 / kW	26.19 / 25.48 / 25.42 / 25.46
	电阻 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.35
	电抗 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	1.1
	长度 / km	0.2

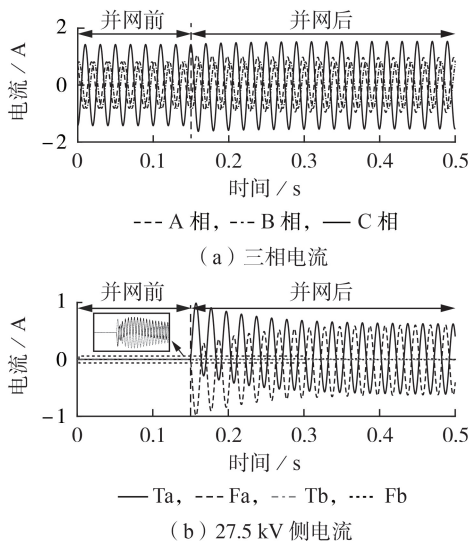


图 1 理想情况下系统动态电流波形

Fig.1 Dynamic waveforms of system current under ideal condition

引起的^[12];

(2)并网后,三相电流增大(有效值分别为 0.68、1.08、0.58 A),这是并网后系统产生的并网电流与并网前三相电流叠加的结果;

(3)并网前系统处于空载状态,27.5 kV 侧电流有效值为 0,而并网后 27.5 kV 侧存在一定的环流(Ta、Fa、Tb、Fb 电流有效值分别为 0.43、0.43、0.005、0.005 A),其产生原因是各台牵引变压器的参数存在差异,导致 2 路 27.5 kV 母线电压存在一定的偏差,进而产生了电流,其中 α 相的 2 台牵引变压器之间差异较大,形成了较大的电流。

图 1 所示仿真结果表明,理想情况(即 2 路进线的三相电压频率相同、相序相同、幅值相同、相位相同、牵引变压器的档位相同)下,牵引变电所并网运

行时,系统三相侧、27.5 kV 侧因设备参数差异会产生一定的并网电流,但数值远小于牵引变压器的额定电流(143.18 A),不会对系统的运行、保护等造成影响,从而验证了牵引变电所2路进线并网运行的可行性。

2 现场试验与模型验证

为了进一步验证并网倒闸的可行性,项目组在宁杭高铁湖州牵引变电所开展了现场论证试验。本节将详细阐述现场试验过程,并对测试结果进行详细分析。

2.1 试验方案

图2为并网倒闸操作现场试验的流程图,各个断路器的位置详见图A1。

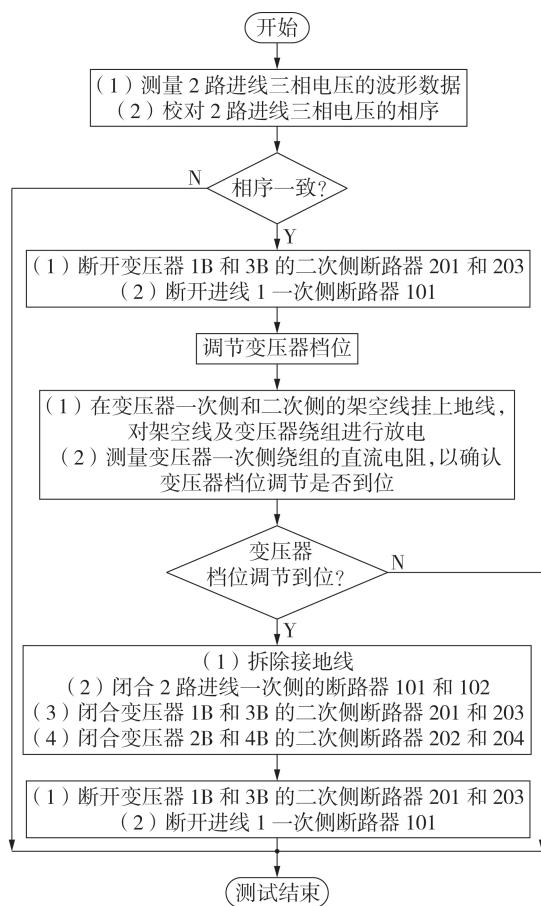


图2 现场试验流程

Fig.2 Flowchart of field test

2.2 试验结果

(1) 相序校对。

图3为进线1和进线2的三相电压测量结果。可以看出,进线1和进线2三相电压的相序均为A-C-B,满足并网倒闸要求。

(2) 电流分析。

当2路进线牵引变压器存在不同档位差时,系统在空载条件下实现并网运行三相高压侧和

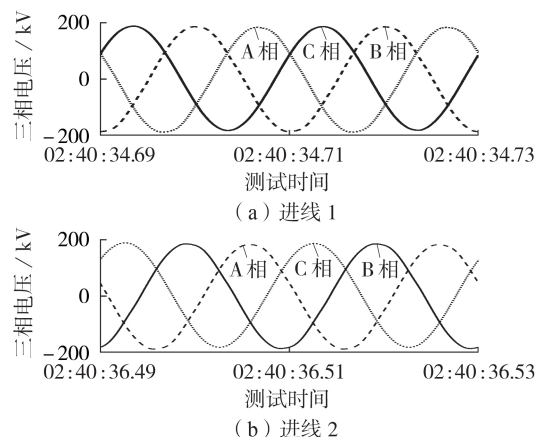


图3 进线的三相电压波形

Fig.3 Three-phase voltage waveforms of incoming line

27.5 kV 侧电流有效值的仿真结果和实测结果如附录中表A1所示。从表中可以看出,三相电流有效值最大为56.88 A,小于牵引变压器的额定电流,不会给系统运行带来影响,从而验证了并网倒闸方案的可实施性。此外,由于仿真分析采用的是幅值相等的理想电压源,而现场三相电压存在一定的波动性^[13],造成仿真结果与实测结果存在一定的误差(最大绝对误差为2.51 A)。但这不会影响相关结论,如牵引变压器档位每相差1,系统非公共相三相电流相差约11 A,27.5 kV 侧电流相差约为非公共相三相电流的4倍。

为进一步验证仿真模型的准确性,图4给出了牵引变压器档位差为3时,系统三相侧、27.5 kV 侧电流的现场实测波形结果和仿真波形结果的对比图。图中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ对应系统所处状态分别如下:①合闸断路器101、102、201、203,进线1投入运行,此时牵引供电系统处于空载状态;②合闸断路器204,此时β相形成环路,三相侧B、C相以及27.5 kV 侧Tb、Fb产生电流;③合闸断路器202,α相形成环路,三相侧A相以及27.5 kV 侧Ta、Fa产生电流,系统实现并网运行。各个断路器的位置见附录中图A1。

从图4可以看出:由于实际电源与仿真电源之间的差异,实测电流的暂态峰值略大于仿真结果;系统在由Ⅰ至Ⅱ、由Ⅱ至Ⅲ状态过渡合闸各断路器后,系统电流存在一定时长的暂态过程(约7~8个周期),随后趋于稳定,电流实测结果与仿真结果暂态过程的变化趋势完全一致。综上,本文建立的仿真模型在稳态和暂态2个方面均具有较高的精度。

3 影响因素分析

3.1 影响因素

图5为并网运行工况下牵引供电系统α相简化模型的等效电路。

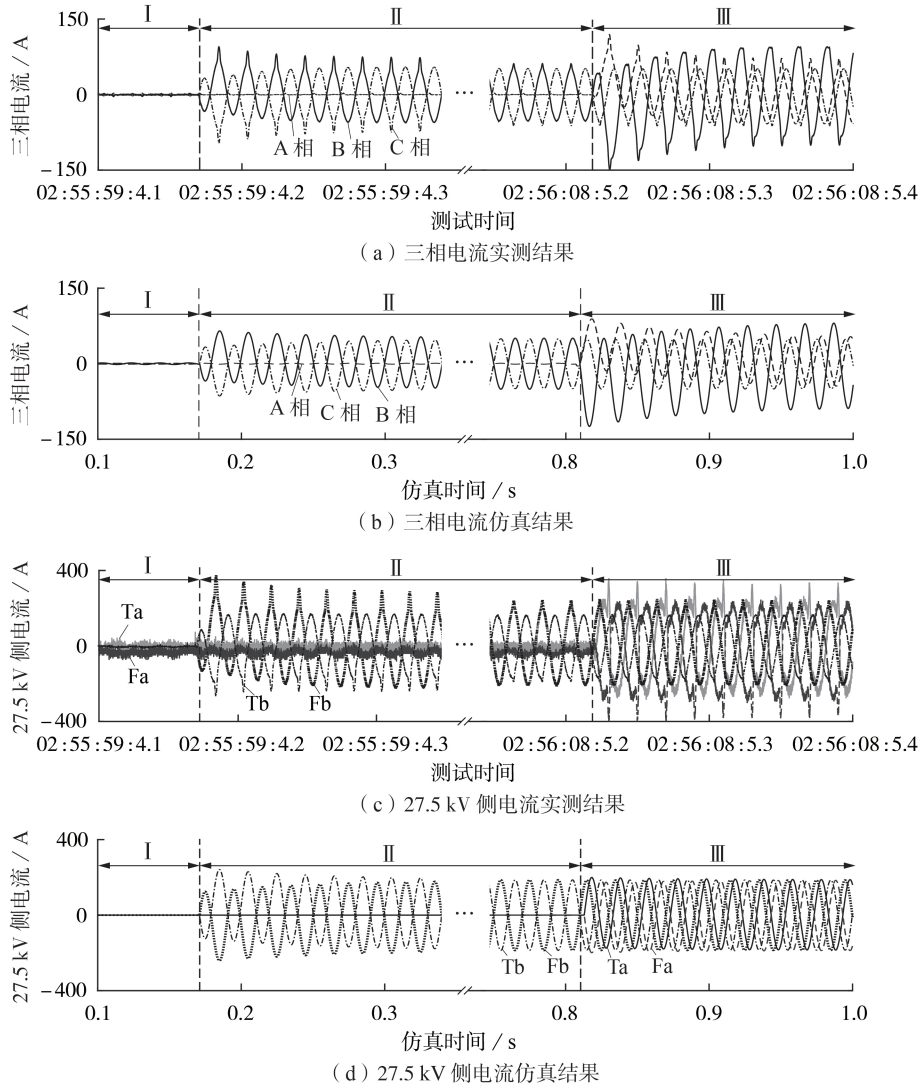


图4 并网过程中系统电流波形对比结果

Fig.4 Comparison of system current waveforms during grid-connected process

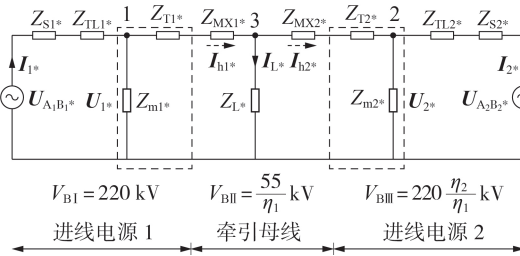


图5 牵引变电所并网运行等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of traction power supply system in grid-connected condition

图中, U_{A1B1} 、 U_{A2B2} 分别为进线电源 1、2 线电压的标幺值; U_{1*} 、 U_{2*} 分别为牵引变压器 1、2 高压侧输入电压的标幺值; I_{h1*} 、 I_{h2*} 、 I_L 分别为进线电源 1、2 的 27.5 kV 侧电流的标幺值和牵引负荷电流的标幺值; I_{1*} 、 I_{2*} 分别为节点 1、2 的注入电流; Z_{S1*} 、 Z_{S2*} 分别为进线电源 1、2 电力系统等效阻抗的标幺值; Z_{TL1*} 、 Z_{TL2*} 分别为进线电源 1、2 输电线路等效阻抗的标幺

值; Z_{T1*} 、 Z_{m1*} 和 Z_{T2*} 、 Z_{m2*} 分别为牵引变压器 1 和 2 等效阻抗的标幺值; Z_{MX1*} 、 Z_{MX2*} 为 27.5 kV 侧等效阻抗的标幺值; Z_{L*} 为牵引负荷等效阻抗的标幺值; V_{B1} 、 V_{BII} 、 V_{BIII} 分别为进线电源 1 侧、27.5 kV 侧、进线电源 2 侧电压; η_1 、 η_2 分别为牵引变压器 1、2 的档位。

系统的节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} I_{1*} \\ I_{2*} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & -y_{13} \\ 0 & y_{22} & -y_{23} \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1*} \\ U_{2*} \\ U_{3*} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_{3*} 为节点 3 的电压; y_{11} 、 y_{22} 、 y_{33} 分别为节点 1、2、3 的自导纳; y_{13} 、 y_{23} 分别为节点 1、3 和节点 2、3 之间的互导纳。各参数计算如下:

$$\begin{cases} I_{1*} = \frac{1}{Z_{S1*} + Z_{TL1*}} U_{A1B1*} \\ I_{2*} = \frac{1}{Z_{S2*} + Z_{TL2*}} U_{A2B2*} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_{11} = \frac{1}{Z_{S1*} + Z_{TL1*}} + \frac{1}{Z_{m1*}} + \frac{1}{Z_{T1*} + Z_{MX1*}} \\ y_{22} = \frac{1}{Z_{S2*} + Z_{TL2*}} + \frac{1}{Z_{m2*}} + \frac{1}{Z_{T2*} + Z_{MX2*}} \\ y_{33} = \frac{1}{Z_{T1*} + Z_{MX1*}} + \frac{1}{Z_{L*}} + \frac{1}{Z_{T2*} + Z_{MX2*}} \\ y_{13} = \frac{1}{Z_{T1*} + Z_{MX1*}} \\ y_{23} = \frac{1}{Z_{T2*} + Z_{MX2*}} \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)–(3),系统并网产生的27.5 kV侧电流为:

$$\begin{cases} I_{h1*} = \frac{U_{1*} - U_{3*}}{Z_{T1*} + Z_{MX1*}} = f(U_{A_1B_1}, U_{A_2B_2}, Z_L, \eta_1, \eta_2) \\ I_{h2*} = \frac{U_{3*} - U_{2*}}{Z_{T2*} + Z_{MX2*}} = f(U_{A_1B_1}, U_{A_2B_2}, Z_L, \eta_1, \eta_2) \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,影响系统并网运行产生电流的主要因素包括电源电压幅值差、电源电压相位差、牵引变压器档位和牵引负荷。下面结合仿真模型分别对这4个影响因素进行详细分析。

3.2 电源电压幅值差

设定牵引变压器档位为额定档位,两进线电源电压初相角偏差为 0° ,进线1电源电压为额定电压,依次改变进线2电源电压值为额定电压的90%、95%和1、1.05、1.1倍。图6为系统并网运行产生的三相电流和27.5 kV侧电流有效值。

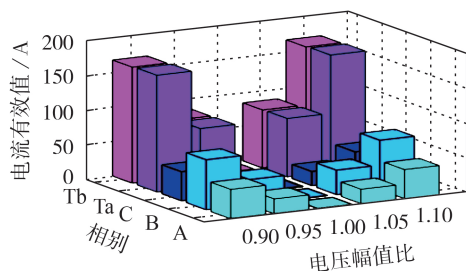


图6 不同电压幅值差下系统电流有效值

Fig.6 RMS current with different RMS voltage variations

由图6可知,两进线电源电压幅值差增大会引起并网电流增大,幅值比每相差0.05,非公共相三相电流有效值相差约21 A,27.5 kV侧电流有效值约为非公共相三相电流的4倍。根据牵引供电系统保护整定计算原则^[14],即保护限值为1.5倍牵引变压器额定电流,得到在本算例条件下2路电源电压幅值比范围约为 $[0.75, 1.25]$ 。因此,当2路进线电源的电压满足电压偏差标准时,即“35 kV及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的10%”,并网运行产生的并网电流不会影响系统的正常运行。

3.3 电源电压相位差

设定牵引变压器档位为额定档位,两进线电源电压幅值均为额定电压,进线1电源电压初相位为 0° ,依次改变进线2电源电压的初相位。图7为系统并网运行产生的三相电流和27.5 kV侧电流有效值。

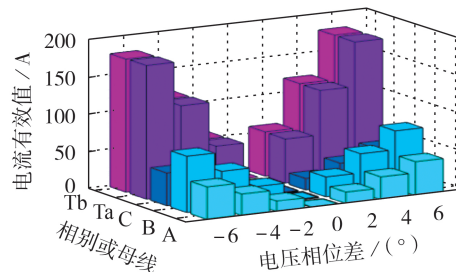


图7 不同电压相位差下系统电流有效值

Fig.7 RMS current with different phase variations

由图7可知,当两进线电源的初相位差增大时,并网电流会随之增加,相位差每相差 2° ,非公共相三相电流有效值相差约15 A,27.5 kV侧电流有效值约为非公共相三相电流的4倍。按照牵引供电系统过流保护整定计算原则,可得到2路电源电压相位允许偏差为 $[-14^\circ, 14^\circ]$ 。

3.4 变压器档位差

设定两进线电源电压幅值均为额定电压,电压初相角偏差为 0° ,进线1牵引变压器档位为1,分别设置进线2牵引变压器档位为1—5。图8为系统并网运行产生的三相电流和27.5 kV侧电流有效值。

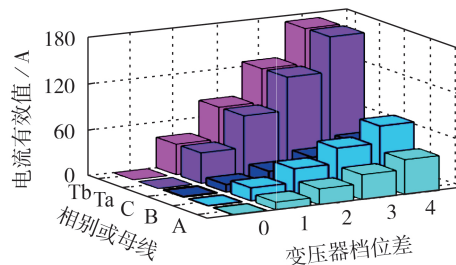


图8 不同变压器档位差下系统电流有效值

Fig.8 RMS current with different transformer ratio variations

由图8可知,随着牵引变压器档位差不断增大,并网电流也随之增大。牵引变压器档位每相差1,非公共相三相电流有效值相差约11 A,27.5 kV侧电流有效值约为非公共相三相电流的4倍。在本算例中,当牵引变压器档位相差4时,公共相三相电流约为88 A,小于系统过流保护整定值,因此不会影响系统的安全稳定运行。

3.5 牵引负荷

设定2路进线牵引变压器档位均为额定档位,两进线电源电压幅值均为额定电压,电压初相角偏差为 0° 。依次改变 α 供电臂上牵引负荷功率分别为

0、1、5、10、15、20 MW。图9为系统并网前、后的三相电流和27.5 kV侧电流有效值。图中,A0、B0、C0和A、B、C分别表示并网前和并网后的三相;T10、T20和T1、T2分别表示并网前和并网后的27.5 kV侧α供电臂、β供电臂T母线。

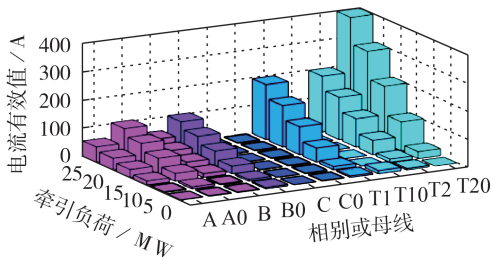


图9 不同牵引负荷下系统并网前、后电流有效值
Fig.9 RMS current with different traction loads before and after grid connection

由图9可知:牵引负荷越大,系统并网电流的有效值越大;并网后,三相电流和27.5 kV侧电流有效值约为并网前的1/2,不会影响系统的安全稳定运行。

3.6 敏感度分析

为了评估不同影响因素对系统并网电流的影响程度,基于归一化和统计方法定义影响因素的敏感度评估指标 $R^{[15]}$,如式(5)所示。

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(I_i - I_{i+1})/I_i}{(F_i - F_{i+1})/F_i} \times 100 \% \quad (5)$$

其中, n 为某个影响因素仿真的工况数量; I_i 为第 i 个工况对应的并网后电流有效值; F_i 为第 i 个工况对应的影响因素值。

表2给出了不同影响因素对系统A相电流的敏感度。从表中可以得出:变压器档位差,2路进线电源电压幅值比、相位差的增大以及牵引负荷的增大均会导致并网电流的增大,影响并网电流最主要的因素是2路进线电源电压幅值差,其次是变压器档位差和2路进线电源电压相位差,牵引负荷对并网电流的影响最小。

表2 不同影响因素对系统并网时电流有效值的敏感度
Table 2 Sensitivity of different influencing factors on RMS current in grid-connected condition

影响因素	影响因素值	I_A / A	R	影响因素	影响因素值	I_A / A	R
变压器档位差	1	10.70	1.07	电压相位差	2°	15.49	0.98
	2	22.26			4°	30.48	
	3	32.67			6°	45.46	
	4	45.64			8°	60.43	
	—	—			10°	75.38	
电压幅值比	1.025	10.25	22.28	牵引负荷	1 MW	3.67	0.90
	1.050	20.79			5 MW	14.58	
	1.075	31.67			10 MW	28.26	
	1.100	41.90			15 MW	41.74	
	1.125	52.45			20 MW	54.96	

4 牵引变电所并网倒闸条件

综合上述分析可得到,牵引变电所短时并网倒闸的实施条件主要包括如下4个:

(1)2路进线电源的频率必须相同,从而防止频率稳定问题;

(2)2路进线电源的相序必须严格相同,避免相序不同导致的相间短路,造成系统保护动作;

(3)2路进线牵引变压器档位差及2路进线电源电压幅值、相位尽可能相近,确保产生较小的并网电流而不影响系统的安全稳定运行;

(4)系统适宜在空载工况或牵引负荷电流较小时实现并网运行,避免并网电流与较大冲击负载电流叠加而影响系统保护装置的正常运行。

5 结论及展望

本文综合应用仿真分析、现场试验、理论分析等研究方法,探讨了牵引变电所短时并网倒闸的可行性及技术条件。主要得到如下结论:

(1)仿真和现场实测结果证明,在满足并网运行条件下,牵引变电所短时并网倒闸不会影响系统的安全稳定运行,具有可实施性;

(2)2路进线电源电压幅值、相位以及供电网络参数的差异越大,并网运行时系统产生的电流越大,其中并网电流的大小对2路进线电源电压幅值差最敏感;

(3)在保证系统保护可靠运行的前提下,当其他因素为理想情况时,2路进线电源电压幅值比允许范围为 $[0.75, 1.25]$,相位差允许范围为 $[-14^\circ, 14^\circ]$,而变压器档位差不会影响系统的安全稳定运行;

(4)本文所搭建的牵引变电所并网仿真分析模型具有较高的稳态和暂态仿真精度,能准确评估短时并网倒闸时系统电流的动态变化特性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈天舒. 对变电运行倒闸操作中常见问题的分析[J]. 机电信息, 2011, 18: 44-45.
CHEN Tianshu. Analysis of common problems in switching operation of substation operation[J]. Electromechanical information, 2011, 18: 44-45.
- [2] 吴仕平, 王汉林, 吕良君, 等. 电源快速切换技术在牵引变电所的应用分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(5): 74-77, 88.
WU Shiping, WANG Hanlin, LÜ Liangjun, et al. Application analysis of power rapid switching technology for railway traction substation[J]. Journal of Railway Engineering, 2017, 34(5): 74-77, 88.
- [3] 赵丽珍, 赵映莲, 杨岳勤, 等. 高速铁路综合维修“天窗”开设形式与行车组织协调问题的研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 127-131.
ZHAO Lizhen, ZHAO Yinglian, YANG Yueqin, et al. Ways of opening comprehensive maintenance “window” and its coordination with traffic organization for high-speed railway[J]. Chi-

- na Railway Science, 2002, 23(2): 127-131.
- [4] 陈立, 陈劲草, 高国强, 等. 高速铁路电力贯通线并网技术研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 30-35.
CHEN Li, CHEN Jincan, GAO Guoqiang, et al. Research on grid-connected technology of power transfixion line of high-speed dedicated passenger railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 30-35.
- [5] 张博文, 陈劲草, 杨坤松, 等. 高速铁路电力贯通线路并网倒闸条件的研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(6): 21-26.
ZHANG Bowen, CHEN Jincan, YANG Kunsong, et al. Research on distribution network connection and breaker switch of power transfixion line of the high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(6): 21-26.
- [6] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 3版. 成都: 西南交通大学出版社, 2012: 7.
- [7] 王玉国. 铁路单回路电力贯通线路短时并列运行及保护配合[J]. 继电器, 2002, 30(10): 65-67.
WANG Yuguo. Short time merged operation and protection cooperation of railway single circuit electric power line[J]. Relay, 2002, 30(10): 65-67.
- [8] HAN Zhengqin, ZHANG Yuge, LIU Shuping, et al. Modeling and simulation for traction power supply system of high-speed railway[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [9] 周婷, 解绍锋. 电气化铁路新型电缆供电方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 189-195, 206.
ZHOU Ting, XIE Shaofeng. New-type cable traction power supply scheme of electric railroad[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 189-195, 206.
- [10] 张桂南, 刘志刚, 向川, 等. 交-直-交电力机车接入的牵引供电系统电压波动特性[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 121-128, 136.
ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Voltage fluctuation characteristics of traction power supply system considering AC-DC-AC electric locomotives accessed[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 121-128, 136.
- [11] HU Haitao, HE Zhengyou, LI Xin, et al. Power-quality impact assessment for high-speed railway associated with high-speed trains using train timetable—part I: methodology and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 693-703.
- [12] 张荣伦, 王帅, 穆海宝, 等. 大型电力变压器损耗带电测试技术研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 683-692.
ZHANG Ronglun, WANG Shuai, MU Haibao, et al. The on-site method for the loss characteristic in power transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 683-692.
- [13] WANG Ke, HU Haitao, CHEN Cai, et al. A simulation platform to assess comprehensive power quality issues in electrified railways[J]. International Journal of Rail Transportation, 2018, 6(4): 233-254.
- [14] 国家铁路局. 铁路电力牵引供电设计规范: TB 10009—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [15] WANG Ke, HU Haitao, ZHENG Zheng, et al. Study on power factor behavior in high-speed railways considering train timetable[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 220-231.

作者简介:



孙文静

孙文静(1995—),女,湖北仙桃人,硕士研究生,主要研究方向为牵引供电系统电能质量分析(E-mail: wjs@my.swjtu.edu.cn);

王科(1989—),男,四川广安人,博士研究生,主要研究方向为牵引供电系统能耗与电能质量分析(E-mail: kircy_kw@my.swjtu.edu.cn);

胡海涛(1987—),男,安徽阜阳人,教授,博士,主要研究方向为牵引供电系统低频振荡与高铁储能(E-mail: hht@swjtu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Short-time grid-connected switching technology for traction substation

SUN Wenjing¹, WANG Ke¹, HU Haitao¹, CHEN Jincan², HE Zhengyou¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. High-speed Rail Operation and Maintenance Technology Centre,

Shanghai Railway Administration, Shanghai 200071, China)

Abstract: Aiming at the drawbacks of the existing switching operation scheme, such as time-cost, power supply interruption, the feasibility and the technical conditions of short-time grid-connected switching operation technology for traction substation are studied. Based on the operating mechanism and topology of traction substation, a detailed simulation model is established with Simulink, and the current characteristics in grid-connected process are analyzed. Then, the detailed procedure for the field test of grid-connected switching is elaborated, and the comparison results between field test and simulation verify the feasibility of the proposed scheme and the accuracy of the established simulation model. Furthermore, the equivalent model of grid-connected operation for traction substation is built, the calculation method of grid-connected current is analyzed, and a sensitivity index is applied to identify the critical influencing factors. The analysis results show that the voltage amplitude deviation between the two utility power supplies is the most critical factor, and the current caused by grid-connected switching does not affect the normal operation of system when the voltage deviation meets the requirements of the national voltage deviation standard. Finally, the technical conditions for grid-connected switching are listed, which can provide theoretical and technical support for the engineering application of grid-connected switching for traction substation.

Key words: traction substation; short-time grid-connected switching; current characteristics; field test; technical condition

附录

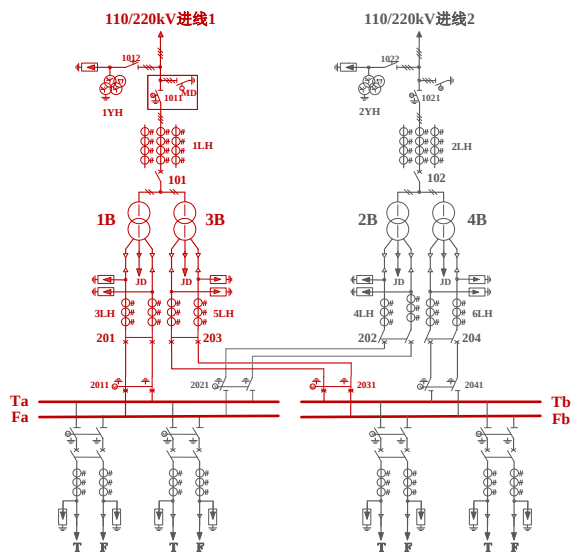


图 A1 牵引变电所主接线示意图

Fig.A1 Schematic diagram of traction substation

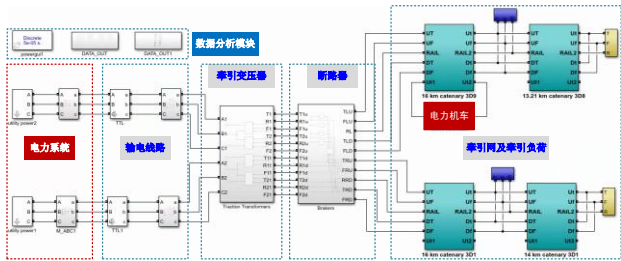


图 A2 牵引供电系统并网仿真模型

Fig.A2 Simulation model of traction power supply system in grid-connected condition

表 A1 并网电流有效值对比结果

Table A1 Comparison of RMS currents between simulation and field test						
变压	三相电流(A/B/C)/A			27.5 kV 母线侧电流(Ta/Fa/Tb/Fb)/A		
器档	实测结果	仿真结果	绝对误差	实测结果	仿真结果	绝对误差
位差						
0	0.58/1.00/0.54	0.68/1.08/0.58	0.10/0.08/0.04	—	0.43/0.43/0.005/0.005	—
1	10.90/18.75/10.78	10.70/18.36/10.68	0.20/0.39/0.10	42.79/43.18/44.18/42.25	44.01/44.01/43.85/43.85	1.22/0.83/0.33/1.60
2	21.68/37.50/21.45	22.26/38.14/22.18	0.58/0.64/0.73	90.00/92.30/92.30/91.60	90.25/90.25/89.90/89.90	0.25/2.05/2.40/1.70
3	33.45/56.88/32.73	32.67/55.71/32.31	0.78/1.17/0.42	132.80/134.54/134.20/130.24	132.20/132.20/131.69/131.69	0.60/2.34/2.51/1.45

注：“—”表示未测量到有效的电流，因为变压器档位差为 0 时，27.5 kV 侧母线电流偏小，超过了电流互感器的有效测量范围。