

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.006

群组列车牵引供电系统过分相合闸过电压特性分析

向念文¹, 徐城林¹, 邵冰冰¹, 苑乾坤¹, 阳晋¹, 王州龙²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心(中国铁道科学研究院集团有限公司), 北京 100081)

摘要:群组列车运行过程中会频繁经过分相区,产生的合闸过电压将对牵引供电系统以及列车高压设备箱造成严重的绝缘损害。为定性分析群组列车的合闸过电压特性,首先,根据电路等效简化原则,建立群组列车牵引供电系统的等效简化动态电路,通过提出合理的假设条件求解出合闸瞬间列车端电压的表达式,从定性关系上揭示了合闸过电压的形成原因;其次,基于群组列车牵引供电系统暂态模型,分析了不同列车数量、分布位置以及运行功率对群组列车合闸过电压的作用机制;最后,在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型,验证了理论分析结果的正确性。结果表明:群组列车数量越多、运行位置越集中、牵引功率越大,就会使得合闸过电压峰值越小。该结果可有效指导群组列车过分相合闸过电压的抑制,降低群组列车经过分相区时产生的合闸过电压。

关键词:群组列车;分相区;合闸过电压;牵引供电系统;电路等效;过电压抑制

中图分类号:TM922.3;U221

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)01-0050-10

0 引言

我国电气化铁路采用工频单相交流供电模式^[1-2],电力系统220 kV或110 kV输电线路经牵引变电所三相-两相变压器转换为27.5 kV的单相交流电传输至铁路接触线^[3-4]。接触线每隔20~30 km左右要设置电分相绝缘装置^[5-7],从而避免不同相位的供电臂发生短路。群组行车条件下,同一供电臂内列车数量增多,会产生更为频繁的操作过电压冲击^[8]。《交通强国建设纲要》明确提到本世纪中叶需实现3万吨级重载列车重大突破^[9],这就要求在现有铁路基础上,扩大群组列车运力。区别于传统供电臂内单车运行,群组列车运行时线路末端过分相列车断路器操作瞬间,产生的过电压冲击不仅危害设备绝缘,而且容易传播到正常列车内部,影响正常列车稳定取流并侵害设备^[10-13]。因此,有必要开展群组行车条件下牵引供电系统过分相过电压暂态特性分析,揭示过分相过电压形成机制。

近年来,国内外大多针对高速列车过分相暂态过程进行研究。文献[14-15]建立单机车过分相过程的等效电路,通过列写电路微分方程解出受电弓过电压暂态关系式。文献[16]分析电力机车进行地面自动过分相时机械开关操作产生的分闸、合闸过电压特性。文献[17]分析列车在不同网压相位下断路器的过电压波形,在网压相位为90°、270°时断开断路器,产生的过电压幅值最大。文献[18]建

立动车组过分相仿真模型,研究接地电感和电容对车体瞬态电压的影响规律。文献[19]针对长编组双受电弓动车组过分相的8个暂态过程,建立Bergeron数学模型和电磁暂态程序(electro-magnetic transient program, EMT)仿真模型,研究合闸相位等因素对受电弓及车体过电压的影响。文献[20]以电力机车模型为基础,通过仿真对过分相暂态过程进行研究,并对不同过程中的过电压大小进行分析。文献[21]对列车过分相进行系统建模,指出列车过分相时产生的车体过电压与开关动作时刻的网压相角密切相关。文献[22]分析列车断路器合闸时主断路器发生的故障,得出断路器断口间可能发生的最大过电压。文献[23]认为在断路器分合闸过程中,车载变压器的过电压受牵引变压器励磁电感和接地电阻器电感值的影响最大。

上述研究大多通过仿真平台,研究合闸相位等因素对列车过分相过电压暂态特性的影响,对合闸过电压的理论推导少有研究。同时,现有研究主要集中在对单辆列车合闸过程中产生的过分相过电压暂态特性进行数学表达式的求解,为分析合闸过电压特性提供了一定的理论依据,但由于表达式的复杂性,难以进一步分析其本质原因。在群组行车条件下,多列车运行数量、分布位置及运行功率等影响下合闸过电压的特性变化缺少理论支撑,值得进一步深入研究。

文中建立群组列车牵引供电系统不同运行工况下的等效简化电路,对不同工况下合闸过电压进行理论推导及定性分析,并通过时域仿真进行验

收稿日期:2024-07-02;修回日期:2024-10-23

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB3907302)

证, 获得群组列车牵引供电系统过分相合闸过电压特性, 揭示过分相合闸过电压的形成机制。同时提出对应的过电压抑制方案, 降低群组列车经过分相区时产生的合闸过电压。

1 群组列车过分相合闸过电压特性分析

1.1 群组列车牵引供电系统过分相过程等值模型

群组列车牵引供电系统等效电路除了包含牵引变电所、接触线、车载断路器和合闸列车的入口电容外^[24-25], 还须考虑多车模型中的正常运行负载。合闸列车的入口电容位于等效电路的末端, 列车负载随其所在位置以及运行功率的变化进行调整。根据电路等效简化原则, n 辆列车的牵引供电系统简化等值电路模型如图 1 所示。

图 1 中, E_m 为牵引变电所电压; L_i 、 R_i 分别为第 i 段接触线集中电感、电阻, $i=1, 2, \dots, n-1$; C_s 为接触线对地电容; C_T 为列车受电弓对地电容; C_r 为变压器入口电容; $Z_{car,i}$ 为第 i 辆列车的正常运行负载, $i=1, 2, \dots, n$; S 为过分相列车断路器合闸开关; L_n 为变压器励磁电感; R_n 为泄露电阻。

1.2 不同影响因素下过分相合闸过电压特性

为研究群组列车过分相过程中不同影响因素对合闸过电压的影响, 选取单列车情况下不具备的 3 个重要影响因素进行分析, 分别为列车数量、群组列车分布位置以及群组列车运行功率。

文中提出 2 个合理的基本假设, 以简化计算。假设 1: 在断路器合闸后极短的时间 Δt 内, 过分相合闸过电压达到峰值, Δt 远小于电源周期的变化时间, 所以认为在 Δt 内, 电源电压保持常量 E_m 不变; 假设 2: 在合闸瞬间由于电路拓扑的变化, 系统能量得到重新分配, 但列车负载感抗远大于线路感抗^[26-27], 而感抗负载支路电流不能突变, 因此认为在合闸瞬间负载支路电流保持不变。

1.2.1 不同列车数量下过分相合闸过电压特性

对不同列车数量下过分相合闸过电压特性进行分析, 为降低计算的复杂性, 选取 1 辆、2 辆、3 辆列车下的等效电路及合闸过电压公式进行求解

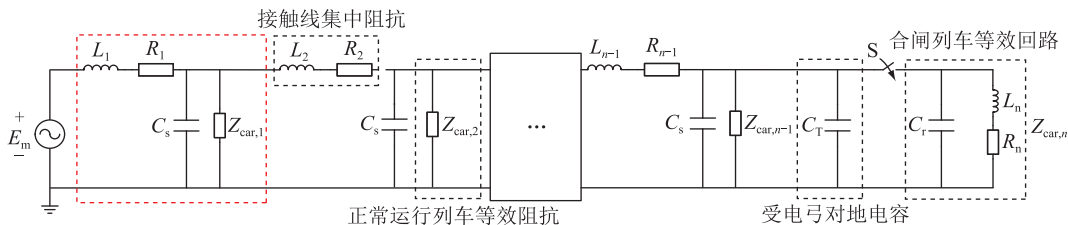


图 1 合闸时 n 辆列车的牵引供电系统简化等值电路模型

Fig.1 Simplified equivalent circuit model of the traction power supply system for n trains closing

说明。

(1) 1 辆列车合闸, 等效电路如图 2 所示。

图 2 中, L_s 、 R_s 分别为接触线集中电感、电阻; u_c 为 1 辆列车时的过分相合闸过电压; C 为变压器入口电容。 S 闭合后, 根据回路基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff voltage law, KVL) 方程可得:

$$u_c + u_R + u_L = E_m \quad (1)$$

式中: u_R 、 u_L 分别为接触线集中电阻、电感的等值电压。又因为:

$$\begin{cases} u_R = R_s i \\ i = C \frac{du_c}{dt} \\ u_L = L \frac{di}{dt} = L_s C \frac{d^2 u_c}{dt^2} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$L_s C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_s C \frac{du_c}{dt} + u_c = E_m \quad (3)$$

该方程为二阶线性常系数非齐次微分方程, 方程的解由非齐次方程的特解 u_{cp} 和对应齐次方程的通解 u_{ch} 组成, 可得式(3)的解为:

$$u_c = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + E_m \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{R_s}{2L_s} \\ \omega^2 = \frac{1}{L_s C} - \left(\frac{R_s}{2L_s}\right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入初始条件: u_c 在 0_+ 时刻的值 $u_c(0_+) = 0$, u_c 的一阶导数在 0_+ 时刻的值 $\left. \frac{du_c}{dt} \right|_{0_+} = 0$, 可得到式(6)。

$$\begin{cases} A = -\frac{E_m}{\sin \beta} \\ \beta = \arctan \frac{\omega}{\delta} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 当接触线上存在 2 辆列车时, 设接触线全线长度为 m , 正常运行列车位于距离牵引变电所 l 处, 则 2 辆列车合闸等效电路如图 3 所示。

图 3 中, L' 、 R' 分别为接触线单位长度集中电

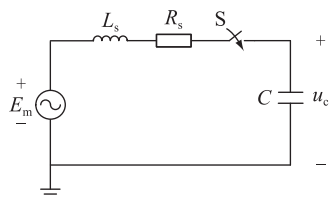


图2 1辆列车合闸等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of 1 train closing

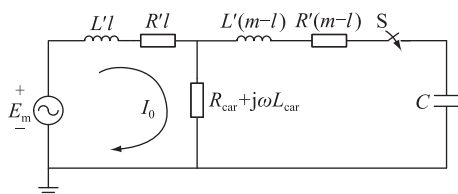


图3 2辆列车合闸等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of 2 trains closing

感、电阻; R_{car} 、 L_{car} 分别为正常行驶列车的等值电阻、电感; I_0 为图示相应回路的回路电流。同理,可列出该回路二阶线性常系数非齐次微分方程为:

$$E_m = u'_c + R'(m-l)C \frac{du'_c}{dt} + L'(m-l)C \frac{d^2u'_c}{dt^2} + \left(I_0 + C \frac{du'_c}{dt}\right) R'l + L'l \frac{d\left(I_0 + C \frac{du'_c}{dt}\right)}{dt} \quad (7)$$

式中: u'_c 为2辆列车时的过分相合闸过电压。化简式(7)得:

$$L'C \frac{d^2u'_c}{dt^2} + R'C \frac{du'_c}{dt} + u'_c = E_m - I_0R'l \quad (8)$$

可得式(8)的解为:

$$u'_c = A'e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + E_m - I_0R'l \quad (9)$$

回路电流 I_0 计算如下:

$$I_0 = \frac{E_m}{\sqrt{(R'l + R_{car})^2 + (\omega L_{car})^2}} \quad (10)$$

将式(10)代入初始条件: u'_c 在 0_+ 时刻的值

$u'_c(0_+) = 0$, u'_c 的一阶导数在 0_+ 时刻的值 $\left. \frac{du'_c}{dt} \right|_{0_+} = 0$,可得到式(11)。

$$A' = -\frac{E_m - I_0R'l}{\sin \beta} \quad (11)$$

参数 δ 、 ω 、 β 与式(5)、式(6)中的取值相同。

(3) 当接触线上存在3辆列车时,正常运行的2辆列车分别位于距离牵引变电所 l_1 、 l_1+l_2 处,则3辆列车合闸等效电路如图4所示。 I_1 、 I_2 为图示相应回路的回路电流。同理,可列出该回路二阶线性常系数非齐次微分方程,即式(12)。

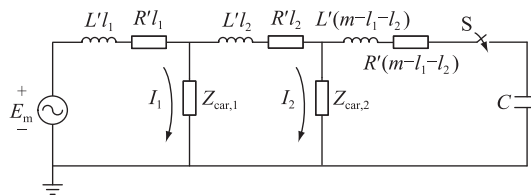


图4 3辆列车合闸等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of 3 trains closing

$$E_m = u''_c + R'(m-l_1-l_2)C \frac{du''_c}{dt} + L'(m-l_1-l_2)C \frac{d^2u''_c}{dt^2} + \left(I_2 + C \frac{du''_c}{dt}\right) R'l_2 + L'l_2 \frac{d\left(I_2 + C \frac{du''_c}{dt}\right)}{dt} + R'l_1 \left(I_1 + I_2 + C \frac{du''_c}{dt}\right) + L'l_1 \frac{d\left(I_1 + I_2 + C \frac{du''_c}{dt}\right)}{dt} \quad (12)$$

式中: u''_c 为3辆列车时的过分相合闸过电压。化简式(12)得:

$$L'C \frac{d^2u''_c}{dt^2} + R'C \frac{du''_c}{dt} + u''_c = E_m - I_1R'l_1 - I_2R'(l_1+l_2) \quad (13)$$

可得式(13)的解为:

$$u''_c = A''e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + E_m - I_1R'l_1 - I_2R'(l_1+l_2) \quad (14)$$

回路电流 I_1 、 I_2 计算如下:

$$\begin{cases} I_1 = \left| \frac{E_m}{1 / \left(\frac{1}{Z_{car,2} + L'l_2 + R'l_2} + \frac{1}{Z_{car,1}} \right) + L'l_1 + R'l_1} \right| \times \left| \frac{L'l_2 + R'l_2 + Z_{car,2}}{L'l_2 + R'l_2 + Z_{car,2} + Z_{car,1}} \right| \\ I_2 = \left| \frac{E_m}{1 / \left(\frac{1}{Z_{car,2} + L'l_2 + R'l_2} + \frac{1}{Z_{car,1}} \right) + L'l_1 + R'l_1} \right| \times \left| \frac{Z_{car,1}}{L'l_2 + R'l_2 + Z_{car,2} + Z_{car,1}} \right| \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入初始条件: u''_c 在 0_+ 时刻的值 $u''_c(0_+) = 0$, u''_c 的一阶导数在 0_+ 时刻的值 $\left. \frac{du''_c}{dt} \right|_{0_+} = 0$,可得到式(16)。

$$A'' = -\frac{E_m - I_1R'l_1 - I_2R'(l_1+l_2)}{\sin \beta} \quad (16)$$

参数 δ 、 ω 、 β 与式(5)、式(6)中的取值相同。

比较式(4)、式(9)、式(14), 并分别将 A 、 A' 以及 A'' 代入可得:

$$\begin{cases} u_c = E_m \left(1 - \frac{1}{\sin \beta} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \right) \\ u'_c = (E_m - I_0 R' l) \left(1 - \frac{1}{\sin \beta} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \right) \\ u''_c = [E_m - I_1 R' l_1 - I_2 R'(l_1 + l_2)] \times \\ \quad \left(1 - \frac{1}{\sin \beta} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \right) \end{cases} \quad (17)$$

因为 $I_1 + I_2 > I_0$, 所以 $E_m > E_m - I_0 R' l > E_m - I_1 R' l_1 - I_2 R'(l_1 + l_2)$, 因此 $u_c > u'_c > u''_c$ 。

通过对 1 辆、2 辆、3 辆列车下合闸过电压等效电路的化简以及过电压表达式的求解, 定性说明了供电臂内列车数量增多, 牵引变电所出口端等效阻抗减小, 会导致接触线电流增大、线路压降增加, 因此作用到变压器入口电容的电压幅值被钳制, 使得合闸过电压减小。

1.2.2 不同群组列车分布位置下过分相合闸过电压特性

选取 4 辆列车时的等效电路及合闸过电压公式求解来说明不同群组列车分布位置对过分相合闸过电压特性的影响。

(1) 正常运行列车指未经过电分相的列车, 当其位于线路首端时合闸等效电路如图 5 所示, 假设 $Z_{car,1} = Z_{car,2} = Z_{car,3}$ 。 Z_a 、 Z_c 分别为接触线某段线路集中阻抗, 由于负载处于线路首端, 故有 $Z_c \ll Z_a \approx j\omega L_s + R_s$, 因此图 5 可等效简化为图 6。其中 Z_{car} 为 $Z_{car,1}$ 、 $Z_{car,2}$ 、 $Z_{car,3}$ 的等值阻抗; u_{c1} 为正常运行列车位于线路首端时的过分相合闸过电压。该回路二阶线性常系数非齐次微分方程与式(3)一致, 其解 u_{c1} 如式(4)所示。

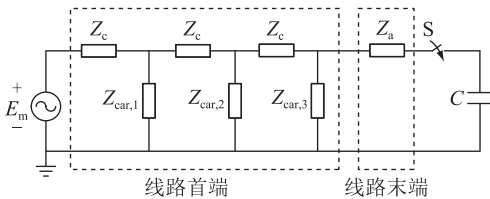


图 5 正常运行列车位于线路首端时合闸等效电路

Fig.5 Closing equivalent circuit of a normal running train located at the head of the line

(2) 正常运行列车平均分布于全线路时合闸等效电路如图 7 所示。 I_3 、 I_4 为图示相应回路的回路电流; u_{c2} 为正常运行列车平均分布于全线路时的过分相合闸过电压。对其作 $Y \rightarrow \Delta$ 变换, 得到其简化电

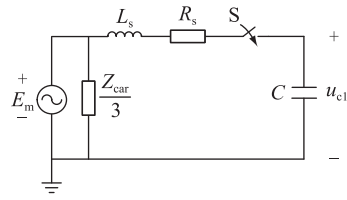


图 6 正常运行列车位于线路首端合闸等效简化电路

Fig.6 Simplified closing equivalent circuit of a normal running train located at the end of the line

路。图中, Δ 变换后的等效阻抗 Z'' 与 Z'_{car} 的值如式(18)、式(19)所示。

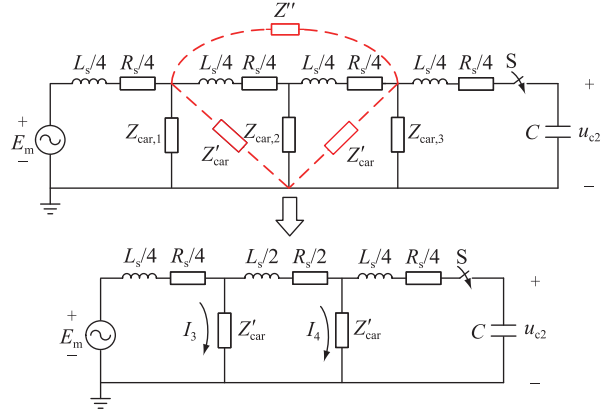


图 7 正常运行列车平均分布于全线路时合闸等效电路

Fig.7 Closing equivalent circuit when the normal running trains are distributed over the whole line

$$Z'' = \frac{Z_{car} \left(\frac{j\omega L_s}{4} + \frac{R_s}{4} \right) + Z_{car} \left(\frac{j\omega L_s}{4} + \frac{R_s}{4} \right) + \left(\frac{j\omega L_s}{4} + \frac{R_s}{4} \right)^2}{Z_{car}} \approx \frac{1}{2} j\omega L_s + \frac{1}{2} R_s \quad (18)$$

$$Z'_{car} = \frac{1}{\left[\frac{1}{Z_{car}} + \frac{j\omega L_s + R_s}{2Z_{car}(j\omega L_s + R_s)} + (j\omega L_s + R_s)^2 \right]} \approx \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_{car}} + \frac{1}{2Z_{car}} \right)} = \frac{2}{3} Z_{car} \quad (19)$$

$t=0_+$ 时刻合闸瞬间, 列出该回路二阶线性常系数非齐次微分方程为:

$$E_m = u_{c2} + \frac{1}{4} R_s C \frac{du_{c2}}{dt} + \frac{1}{4} L_s C \frac{d^2 u_{c2}}{dt^2} + \frac{1}{2} R_s \left(I_4 + C \frac{du_{c2}}{dt} \right) + \frac{1}{2} L_s \frac{d \left(I_4 + C \frac{du_{c2}}{dt} \right)}{dt} + \frac{1}{4} R_s \left(I_3 + I_4 + C \frac{du_{c2}}{dt} \right) + \frac{1}{4} L_s \frac{d \left(I_3 + I_4 + C \frac{du_{c2}}{dt} \right)}{dt} \quad (20)$$

化简并求解得:

$$L_s C \frac{d^2 u_{c2}}{dt^2} + R_s C \frac{du_{c2}}{dt} + u_{c2} = E_m - \frac{1}{2} R_s I_4 - \frac{1}{4} R_s (I_3 + I_4) \quad (21)$$

$$u_{c2} = B_1 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + E_m - \frac{1}{2} R_s I_4 - \frac{1}{4} R_s (I_3 + I_4) \quad (22)$$

回路电流 I_3 、 I_4 计算如下:

$$\left\{ \begin{aligned} I_3 &= \frac{E_m}{1 / \left[\frac{1}{Z'_{car} + (j\omega L_s l_2 + R_s) / 2} + \frac{1}{Z'_{car}} \right] + \frac{j\omega L_s + R_s}{4}} \times \frac{|(j\omega L_s + R_s) / 2 + Z'_{car}|}{|(j\omega L_s + R_s) / 2 + 2Z'_{car}|} \\ I_4 &= \frac{E_m}{1 / \left[\frac{1}{Z'_{car} + (j\omega L_s l_2 + R_s) / 2} + \frac{1}{Z'_{car}} \right] + \frac{j\omega L_s + R_s}{4}} \times \frac{Z'_{car}}{|(j\omega L_s + R_s) / 2 + 2Z'_{car}|} \end{aligned} \right. \quad (23)$$

将式(23)代入初始条件: u_{c2} 在 0_+ 时刻的值 $u_{c2}(0_+) = 0$, u_{c2} 的一阶导数在 0_+ 时刻的值 $\left. \frac{du_{c2}}{dt} \right|_{0_+} = 0$, 可得到式(24)。

$$B_1 = \frac{E_m - \frac{1}{2} R_s I_4 - \frac{1}{4} R_s (I_3 + I_4)}{\sin \beta} \quad (24)$$

(3) 正常运行列车位于线路末端时合闸等效电路如图8所示。 u_{c3} 为正常运行列车位于线路末端时的过分相合闸过电压; I_5 为图示相应回路的回路电流。

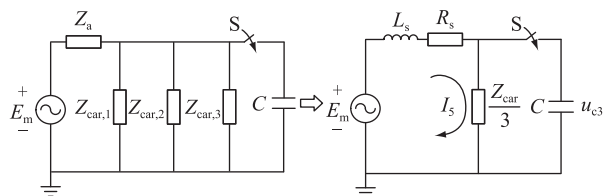


图8 正常运行列车位于线路末端合闸等效电路及其简化电路

Fig.8 Closing equivalent circuit and simplified equivalent circuit of a normal running train located at the end of the line

$t=0_+$ 时刻合闸瞬间, 列出该回路二阶线性常系数非齐次微分方程为:

$$u_{c3} + \left(I_5 + C \frac{du_{c3}}{dt} \right) R_s + L_s \frac{d \left(I_5 + C \frac{du_{c3}}{dt} \right)}{dt} = E_m \quad (25)$$

化简得:

$$L_s C \frac{d^2 u_{c3}}{dt^2} + R_s C \frac{du_{c3}}{dt} + u_{c3} = E_m - I_5 R_s \quad (26)$$

解得:

$$u_{c3} = B_2 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) + E_m - I_5 R_s \quad (27)$$

回路电流 I_5 计算如下:

$$I_5 = \frac{E_m}{j\omega L_s + R_s + Z_{car}/3} \quad (28)$$

将式(28)代入初始条件: u_{c3} 在 0_+ 时刻的值

$$u_{c3}(0_+) = 0, u_{c3} \text{ 的一阶导数在 } 0_+ \text{ 时刻的值 } \left. \frac{du_{c3}}{dt} \right|_{0_+} = 0, \text{ 可得到式(29)。}$$

$$B_2 = - \frac{E_m - I_5 R_s}{\sin \beta} \quad (29)$$

比较3种工况下合闸过电压的大小, 即式(4)、式(22)和式(27), 并分别将 A 、 B_1 以及 B_2 代入可得:

$$\left\{ \begin{aligned} u_{c1} &= E_m \left(1 - \frac{1}{\sin \beta} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \right) \\ u_{c2} &= \left[E_m - R_s \left(\frac{3}{4} I_4 + \frac{1}{4} I_3 \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\sin \beta} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \right) \\ u_{c3} &= (E_m - I_5 R_s) \left(1 - \frac{1}{\sin \beta} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \right) \end{aligned} \right. \quad (30)$$

由式(30)可知, $u_{c1} > u_{c2}$ 、 $u_{c1} > u_{c3}$ 。比较 u_{c2} 和 u_{c3} 式前常系数的大小关系, 由于 I_4 所在支路与 I_3 所在支路呈并联关系, 且 I_4 所在支路电阻大于 I_3 所在支路电阻, $I_4 < I_3$, 故有式(31)所示大小关系。又通过比较 I_3 、 I_5 的电流表达式知 $I_3 < I_5$, 故有式(32)所示大小关系, 因此结合式(19)可知 $u_{c1} > u_{c2} > u_{c3}$ 。

$$\begin{aligned} E_m - R_s \left(\frac{3}{4} I_4 + \frac{1}{4} I_3 \right) &> \\ E_m - R_s \left(\frac{3}{4} I_3 + \frac{1}{4} I_3 \right) &= E_m - I_3 R_s \end{aligned} \quad (31)$$

$$E_m - I_5 R_s < E_m - I_3 R_s < E_m - R_s \left(\frac{3}{4} I_4 + \frac{1}{4} I_3 \right) \quad (32)$$

综上, 通过对4辆列车不同分布位置下合闸过电压等效电路的化简以及过电压表达式的求解, 定性说明了当过分相列车与其他列车相对平均距离越远时, 其他列车等效阻抗越与电源呈现并联关

系,使得合闸瞬间电源电压不被钳制,从而列车入口电容端过电压越大。

1.2.3 不同群组列车运行功率下过分相合闸过电压特性

群组列车运行功率不同主要体现在列车等效阻抗不同,以4辆列车平均分布为例,正常列车运行功率为6.4 MW,当列车运行功率改变时,会影响合闸过电压的大小,设置列车运行功率分别为3、6.4、9 MW。群组列车的简化等效电路如图9所示,合闸过电压的全解如式(22)所示。当 $Z'_{car} > (L_s + R_s)/2$ 时,可忽略部分线路阻抗,故可进一步简化为图9右侧。

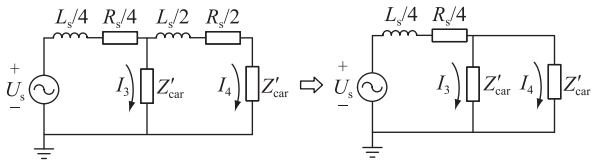


图9 合闸前的稳态电路简化

Fig.9 Simplification of the steady state circuit before closing

$$I_3 = I_4 = \frac{E_m}{\frac{1}{4}L_s + \frac{1}{4}R_s + \frac{1}{2}Z_{car}} \quad (33)$$

$$Z = \left(\frac{U^2}{\bar{S}}\right)^* \quad (34)$$

式中: Z 为列车的等值阻抗; U 为列车变压器的电压; \bar{S} 为列车运行的复功率。根据式(34)可知,当列车变压器的电压 U 不变时,列车运行功率为3、6.4、9 MW时的阻抗 Z_3 、 $Z_{6.4}$ 、 Z_9 满足 $Z_3 > Z_{6.4} > Z_9$,因此随着列车运行功率增大, I_3 与 I_4 电流增大,式(22)前常系数的值减小,故列车运行功率为3、6.4、9 MW时的过分相合闸过电压 $u_{c,3}$ 、 $u_{c,6.4}$ 、 $u_{c,9}$ 满足 $u_{c,3} > u_{c,6.4} > u_{c,9}$ 。由此可以得出,列车运行功率越小,合闸过电压越大。

2 群组列车过分相合闸过电压仿真验证

为验证群组列车过分相过程中不同因素对合闸过电压的影响特性,建立多列车过分相合闸过电压的PSCAD/EMTDC仿真模型。

2.1 不同列车数量的仿真

群组列车运行过程中,由控制系统指挥各列车的运行状态,一般情况下群组列车应保持间隔均等、速度相同。若须实现3万t的货物运输量,则要求扩大群组列车运力。以韶山系列列车为例,牵引货物5 000 t,则须在长度30 km的供电臂上配置6台电力机车,仿真示意如图10所示。

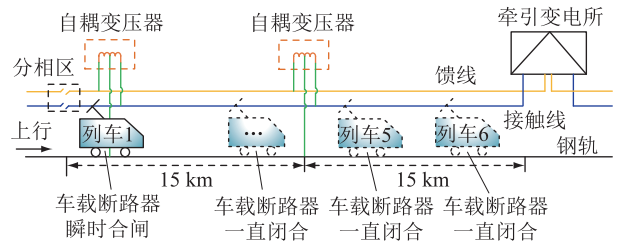


图10 不同列车数量合闸过电压仿真示意

Fig.10 Closing overvoltage simulation with different train numbers

图10中右侧列车表示不同数量的群组列车沿接触线正常运行,最左侧列车表示刚经过分相区,即将进行断路器合闸操作。按照距离牵引变电所由近到远的顺序标为列车6、列车5、...、列车1,同时设置不同的仿真工况,如表1所示。

表1 不同列车数量合闸过电压仿真工况布置

Table 1 Simulation of closing overvoltage conditions with different number of trains

工况	列车数量	各列车距离牵引变电所距离/km	列车运行功率/MW
case1	1	30	6.4
case2	2	15、30	6.4
case3	4	0、10、20、30	6.4
case4	6	3.6、11.1、15、18.6、26.1、30	6.4

仿真中列车主回路电缆长度较短,为确保仿真精度,设置仿真步长为 $0.05 \mu s$ 。通过仿真获得不同合闸相位下过分相列车车载变压器过电压峰值,如图11所示。

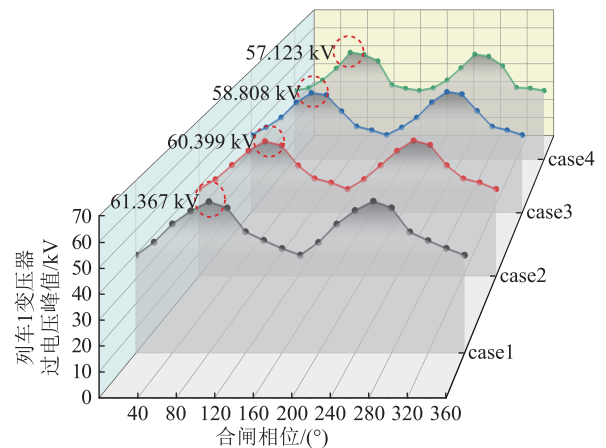


图11 列车数量对过分相列车车载变压器过电压峰值的影响

Fig.11 Influence of train numbers on the peak overvoltage of on-board transformers of split-phase train

由图11可知,在不同合闸相位($0^\circ \sim 360^\circ$)下,车载变压器过电压呈现周期性变化,在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 与 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,过电压峰值变化趋势基本相同。

列车数量越多,列车变压器过电压峰值越小,与1.2.1节理论分析结果一致。

2.2 不同列车分布位置的仿真

群组行车过程中,发生事故或收到调度命令会直接影响列车的运行状态,使彼此之间发生相对位移,故群组列车不会在每时每刻都完全按照平均位置分布。为研究群组列车处于不同相对位置时对合闸过电压的影响特性,选取6辆列车进行分析,保持6.4 MW运行功率,设置3种仿真工况,如图12—图14所示。

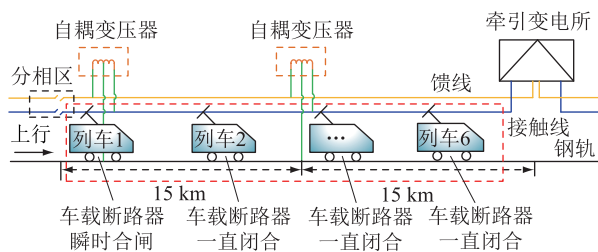


图12 6辆列车全线平均位置分布 (case5)

Fig.12 Average position distribution of 6 trains across the line (case5)

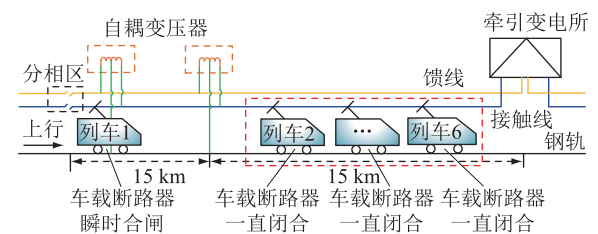


图13 其中5辆稳定运行列车位于线路首端 (case6)

Fig.13 Five stabilized trains located at the head of the line (case6)

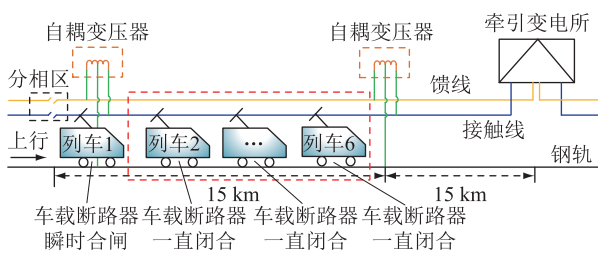


图14 其中5辆稳定运行列车位于线路末端 (case7)

Fig.14 Five stabilized trains located at the end of the line (case7)

分别对 case5、case6、case7 进行仿真分析,得到不同合闸相位下过分相合闸列车与其他5辆正常运行列车的暂态过电压特性,如图15所示。

当供电臂内有6辆列车运行时,case5、case6、case7的车载变压器过电压最大峰值发生在合闸相位为80°或100°时,分别为57.123、58.376、55.544 kV。由此可见,其中5辆稳定运行列车位于线路首端时(case6),变压器过电压峰值最大,其中5辆稳

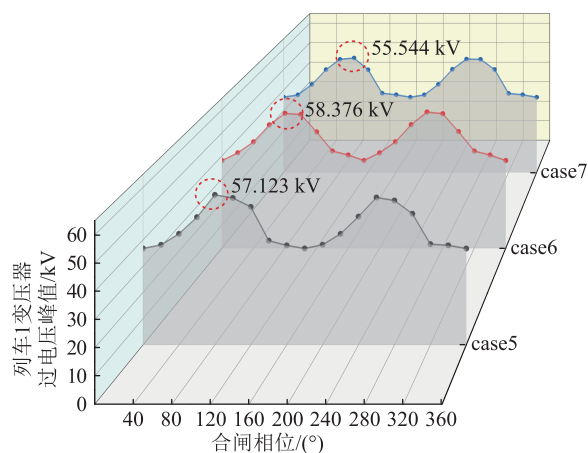


图15 群组列车分布位置对过分相列车车载变压器过电压的影响

Fig.15 Influence of distribution positions of group trains on the overvoltage of on-board transformers of split-phase train

定运行列车位于线路末端时(case7),变压器过电压峰值最小。即可总结得到,当另外5辆列车距离过分相列车的平均分布位置越近时,过分相列车车载变压器过电压峰值越小。主要原因为:当多辆列车集中在过分相列车附近时,该段区域接触线供载功率为所有列车所需功率之和,较大程度拉低了该段接触线电压大小,以至于当过分相列车在此进行合闸操作时,合闸瞬间的起始电压较低,所引起过电压峰值也较小。仿真结果验证了1.2.2节理论分析的正确性。

2.3 不同列车运行功率的仿真

群组列车运行过程中,会受到天气、路段坡度等的影响,列车从始发到终点并不会一直保持匀速、恒功率运行。当列车高功率加速时,其在系统中的等效负荷阻抗变小,合闸过电压的等效动态回路也会发生改变。为研究群组列车运行功率对合闸过电压的影响特性,以6辆列车全线平均位置分布为例,设置列车运行功率分别为3、6.4、9 MW,分别在不同合闸相位下开展仿真特性分析,结果如图16所示。

由图16可知,当供电臂内有6辆群组列车运行、供电臂内平均位置分布时,对于3、6.4、9 MW运行功率的群组列车而言,车载变压器过电压最大峰值均发生在合闸相位为80°或260°时,分别为58.62、56.10、54.05 kV。由此可见,运行功率3 MW时,变压器过电压峰值最大,运行功率9 MW时,变压器过电压峰值最小。主要原因为:高功率运行的列车相对瞬时取流较大,多车电流叠加将进一步造成牵引变压器出口处电流增大,即由牵引变电所到分相区间的电压降落增大,则线路末端(分相区)

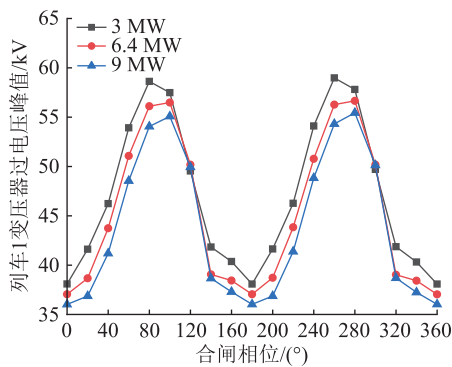


图 16 群组列车运行功率对过分相列车车载变压器过电压的影响

Fig.16 Influence of operating power of group trains on the overvoltage of on-board transformers of split-phase train

的网压较低。当列车在该位置处进行合闸操作时,由于合闸瞬间的起始电压较低,所引起过电压峰值也较小。仿真结果验证了 1.2.3 节理论分析的正确性。

3 结论

(1) 供电臂内列车数量增多时,牵引变电所出口端的等效阻抗减小,导致接触线电流的增大、线路压降增加,使得过分相列车合闸过电压越小。

(2) 过分相列车与其他列车相对平均距离越远时,其他列车等效阻抗越与电源呈现并联关系,使得合闸瞬间电源电压不被钳制,从而过分相列车合闸过电压越大。

(3) 列车运行功率越大时,其等效阻抗越小,使得正常运行列车阻抗支路上的电流越大,从而过分相列车合闸过电压越小。

文中选取了单辆列车所不具备的 3 个影响因素,对群组列车牵引供电系统过分相合闸过电压特性进行分析,得出的结论可有效指导群组列车过分相合闸过电压的抑制,即当有列车即将经历过分相合闸过程时,其余列车可通过瞬时加速来提升整体运行功率,并靠近过分相列车,从而减小合闸过电压。

致 谢

本文得到中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2023YQTD0076),国家铁路智能运输系统工程技术研究中心(中国铁道科学研究院集团有限公司)开放课题基金项目(2022YJ034&RITS2022KF-09)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 周灿伟. 双流制牵引供电系统电分相“车-网”电气耦合研究

[J]. 电工技术,2022(21):61-64,69.

ZHOU Canwei. Research on "network-locomotive" electrical coupling of double flow modes traction power supply system[J]. Electric Engineering,2022(21):61-64,69.

[2] 张明锐,张宁川,刘正威. 动车组合闸过电压故障机理分析及仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(6):84-89,94. ZHANG Mingrui, ZHANG Ningchuan, LIU Zhengwei. Mechanism analysis and simulation study of closing overvoltage fault in EMU circuit breaker[J]. Urban Mass Transit,2024,27(6):84-89,94.

[3] 周京华,闫天乐,章小卫,等. 电气化铁路多电平贯通式同相供电装置拓扑与控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(6):42-53.

ZHOU Jinghua, YAN Tianle, ZHANG Xiaowei, et al. Topology and control of multi-level trough-type cophase power supply device for electrified railway[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2022,34(6):42-53.

[4] 汪淳. 基于集中式交直交电源的铁路供电方案研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(12):74-80.

WANG Chun. Research on the railway power supply solution based on centralized AC-DC-AC power[J]. Journal of Railway Engineering Society,2021,38(12):74-80.

[5] 胡晓磊,汪海瑛,丁宇鸣,等. 京沪高铁接触网动态检测评价与预警方法[J]. 中国铁路,2024(5):25-32.

HU Xiaolei, WANG Haiying, DING Yuming, et al. Dynamic inspection evaluation and warning methods of the OCS on Beijing-Shanghai HSR[J]. China Railway,2024(5):25-32.

[6] 曹恩凡,张保磊,张贇,等. 电气化铁路柔性不断电过分相与电能质量治理方案[J]. 电气化铁道,2024,35(3):27-34.

CAO Enfan, ZHANG Baolei, ZHANG Yun, et al. Scheme for flexible passing of neutral section with power uninterrupted and power quality control[J]. Electric Railway,2024,35(3):27-34.

[7] 周虹屹,刘志刚,邓云川,等. 针对电气化铁路电分段电弧的建模分析与抑制方法研究[J]. 电网技术,2023,47(6):2583-2593.

ZHOU Hongyi, LIU Zhigang, DENG Yunchuan, et al. Suppression of arcing generated by articulated split-zone insulator on electrified railways[J]. Power System Technology,2023,47(6):2583-2593.

[8] 陈海涛,崔焕庆. 浅析接触网硬点对高速铁路的影响[J]. 电气化铁道,2023,34(S2):88-92.

CHEN Haitao, CUI Huanqing. Analysis on the influence of catenary hard point on high-speed railway[J]. Electric Railway,2023,34(S2):88-92.

[9] 中共中央国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19) [2024-09-30]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.

The CPC Central Committee and State Council issue the program of building national strength in transportation[EB/OL]. (2019-09-19) [2024-09-30]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.

- [10] 王翼云,胡海涛,黄毅,等. 电气化铁路分区所多功能潮流控制系统及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(12):4639-4652.
WANG Yiyun, HU Haitao, HUANG Yi, et al. A novel multi-functional power flow control system and its control strategy in section post for electrified railway [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4639-4652.
- [11] GHAFOURIAN S M, ARANA I, HOLBØLL J, et al. General analysis of vacuum circuit breaker switching overvoltages in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2351-2359.
- [12] 肖嵩,朱涛,段君璋,等. 高速列车过绝缘节轮轨间拉弧机理分析及抑制[J]. 铁道学报, 2024, 46(6): 46-55.
XIAO Song, ZHU Tao, DUAN Junzhang, et al. Mechanism analysis and suppression of arcing between wheel and rail of high-speed train over insulated joints[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 46-55.
- [13] 肖嵩,曹野,吴广宁,等. 高铁过电压对车载牵引供电系统的影响机理及抑制方法:系统性综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4682-4702.
XIAO Song, CAO Ye, WU Guangning, et al. Influence mechanism and suppression methodologies of the overvoltage of high-speed railway on the vehicle-mounted traction power supply system: systematic review[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4682-4702.
- [14] 赵杰杰,周凯,吴科,等. 牵引机车过分相时高频谐波分析及对电缆终端发热问题研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(6): 17-22, 43.
ZHAO Qingjie, ZHOU Kai, WU Ke, et al. The analysis of high frequency harmonic and the research of the problem for cable termination during passing natural section of traction locomotive[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(6): 17-22, 43.
- [15] 肖嵩,段君璋,朱涛,等. 高速铁路弓网离线过电压对车体电位的影响[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(5): 180-190.
XIAO Song, DUAN Junzhang, ZHU Tao, et al. Impact of pantograph-catenary off-line overvoltage on car body potential in high-speed railway[J]. China Railway Science, 2023, 44(5): 180-190.
- [16] 李茜钰,孙继星,郭昌旺,等. 动车组分相过电压特性与断路器相控合闸方案[J]. 电气化铁道, 2020, 31(S2): 37-41.
LI Xiyu, SUN Jixing, GUO Changwang, et al. Characteristics of split-phase overvoltage of EMU and phase-controlled closing scheme of circuit breaker [J]. Electric Railway, 2020, 31(S2): 37-41.
- [17] 高国强,陈盼. 动车组操作过电压特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 62-67.
GAO Guoqiang, CHEN Pan. Research on vehicle-mounted vacuum circuit breaker interrupting overvoltage[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 62-67.
- [18] 田志强,陈祖祥,袁庚,等. 动车组自动断电过分相车体瞬态过电压优化研究[J]. 电工技术, 2021(20): 5-8.
TIAN Zhiqiang, CHEN Zuxiang, YUAN Geng, et al. Study on the EMU body overvoltage of automatic power failure passing neutral section device [J]. Electric Engineering, 2021(20): 5-8.
- [19] HUANG K, LIU Z G, LI X. Research on electromagnetic transient processes of long marshalling high-speed train passing articulated split-phase region [J]. IEEE Access, 2019, 7: 78597-78615.
- [20] 谢曲天,盛义发,李永胜,等. 基于 ATP-EMTP 的电力机车过分相暂态过程研究[J]. 电气技术, 2015, 16(4): 11-13, 60.
XIE Qutian, SHENG Yifa, LI Yongsheng, et al. Research on transient process of electrical locomotive passing neutral section based on ATP-EMTP [J]. Electrical Engineering, 2015, 16(4): 11-13, 60.
- [21] 黄可,刘志刚,王英,等. 动车组过分相的车体最佳接地技术分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 1-8.
HUANG Ke, LIU Zhigang, WANG Ying, et al. Analysis of optimal body grounding technology in case of electric multiple unit passing neutral section device [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 1-8.
- [22] 杨军. 高速动车组高压箱内异常放电故障分析及解决方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 133-135, 140.
YANG Jun. Analysis of abnormal discharge fault in high-voltage electric box and solutions [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(9): 133-135, 140.
- [23] 黄毅,胡海涛,王翼云,等. 电气化铁路列车柔性不断电过分相系统及其控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4959-4969.
HUANG Yi, HU Haitao, WANG Yiyun, et al. Flexible uninterrupted phase-separation passing system and its control strategy for electrified railway trains [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4959-4969.
- [24] 罗忠游,赵普志,段玉,等. 电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 124-134.
LUO Zhongyou, ZHAO Puzhi, DUAN Yu, et al. A negative sequence optimization compensation strategy for an electrified railway connected to wind power integration areas [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 124-134.
- [25] 沈睿,韩正庆,刘淑萍,等. 高速铁路全并联 AT 牵引网端口阻抗特性研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(5): 40-46.
SHEN Rui, HAN Zhengqing, LIU Shuping, et al. Research on port impedance characteristics of high-speed railway all parallel autotransformer traction network [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(5): 40-46.
- [26] 唐圣德,胡海涛,肖冬华,等. 基于阻抗测量信息的电气化铁路“多车共网”系统稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6039-6053.
TANG Shengde, HU Haitao, XIAO Donghua, et al. Stability analysis of electrified railway multiple train-network system based on impedance measurement information [J]. Trans-

actions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (19): 6039-6053.

- [27] 邵冰冰, 赵峥, 肖琪, 等. 多直驱风机经柔直并网系统相近次同步振荡模式参与因子的弱鲁棒性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 754-769.

SHAO Bingbing, ZHAO Zheng, XIAO Qi, et al. Weak robustness analysis of close subsynchronous oscillation modes' participation factors in multiple direct-drive wind turbines with the VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 754-769.

作者简介:



向念文

向念文(1985), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进输电技术、新型电力系统智能感知等 (E-mail: xiangnianwen@ hfut. edu. cn);

徐城林(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为贯通式同相牵引供电系统;

邵冰冰(1995), 男, 博士, 讲师, 通信作者, 研究方向为新型电力系统稳定性分析与控制。

Neutral zone closing overvoltage characteristics analysis in traction power supply system for group trains

XIANG Nianwen¹, XU Chenglin¹, SHAO Bingbing¹, YUAN Qiankun¹, YANG Jin¹, WANG Zhoulong²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. The Center of National Railway Intelligent Transportation System Engineering and Technology (China Academy of Railway Sciences Corporation Limited), Beijing 100081, China)

Abstract: During the operation of group trains, the trains frequently pass through the neutral zone. Then, the generated closing overvoltage will cause serious insulation damage to the traction power supply system and the trains' high-voltage equipment box. In order to qualitatively analyze the closing overvoltage characteristics of group trains, the equivalent simplified dynamic circuit of the traction power supply system of group trains is established according to the principle of circuit equivalent simplification. The expression of the train terminal voltage at the moment of closing is solved by reasonable assumptions, which reveals the formation reasons of the closing overvoltage in terms of the qualitative relationship. Based on the transient model of the group train traction power supply system, the influence of different train numbers, distribution locations and operating power on the closing overvoltage of group trains is investigated. Finally, a simulation model is built in PSCAD/EMTDC to verify the correctness of the theoretical analysis results. The results show that with the increase of the number of group trains, the centralization of the operation location, and the traction power, the peak closing overvoltage decreases. The results can also effectively guide the closing overvoltage mitigation of group train neutral zone, which reduces the closing overvoltage when the group trains pass through the neutral zone.

Keywords: group trains; neutral zone; closing overvoltage; traction power supply system; circuit equivalent; overvoltage suppression

(编辑 方晶)