

DOI: 10.7667/PSPC160832

电力机车变压器和应涌流产生机理与影响因素

赵元哲, 李群湛, 周福林, 李亚楠

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为研究电气化铁道电力机车变压器和应涌流产生机理, 建立了牵引供电系统、合闸电力机车以及运行电力机车的数学模型, 利用 Laplace 变换求解出机车变压器磁链的解析解。通过搭建车网仿真平台分析了合闸变压器和运行变压器的磁链变化过程以及多种条件下和应涌流的变化规律, 得到了影响和应涌流变化的关键因素, 并分析了励磁涌流以及和应涌流对牵引网电压的影响。分析结果表明了合闸电力机车的励磁涌流会造成运行电力机车出现和应涌流现象, 并造成牵引网电压发生严重跌落和畸变, 为车网系统出现的异常跳闸现象提供参考。

关键词: 电力机车; 变压器; 和应涌流; 磁链; 直流电压

Mechanism and influencing factors of electric locomotive sympathetic inrush

ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, LI Yanan

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

Abstract: In order to research the mechanism of sympathetic inrush occurring in electric locomotive transformer, the mathematical model including traction power supply system, closing locomotive and operating locomotive is established, flux linkage analytical solutions of locomotives transformers flux are obtained by using Laplace transform. The flux variety processes of closing transformer and operating transformer are analyzed though building simulation model. By studying variation of sympathetic inrush under different conditions, the influencing factors of sympathetic inrush are obtained, and the influence of the inrush current and sympathetic on traction network voltage is analyzed. The results show that the inrush current of closing electric locomotive could cause sympathetic inrush of the operating electric locomotive and make the voltage of traction network drop and seriously distort, which provide a reference for abnormal tripping of traction power supply system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134205).

Key words: electric locomotive; transformer; sympathetic inrush; flux linkage; DC voltage

0 引言

变压器在空载投入或外部故障切除时系统电压恢复的过程中, 易产生很大的励磁涌流。较大的励磁涌流不仅可能会引起差动保护误动作, 还可能造成邻近的并联变压器产生和应涌流现象^[1-3], 影响系统可靠、稳定运行。

电气化铁道牵引供电系统一般采用轮换相序、分相分区供电, 不同供电区间之间存在电分相环节^[4]。电力机车在通过电分相时车载变压器会依次进行一次分闸和合闸操作, 其恢复供电时可能产生励磁涌流现象, 且断路器操作间隔时间短, 变压器的磁通

衰减量小, 涌流现象将会更为突出。当同一供电区间出现双车甚至多车运行的状态时, 合闸变压器产生的励磁涌流可能通过牵引网影响到同一供电区间其他电力机车。

国内外围绕和应涌流的产生机理、影响因素和特征开展了大量研究。文献[5]通过分析空载合闸变压器的等效电路图和变压器内部磁链的变化规律, 说明了励磁涌流的产生机理。文献[6]在假设运行变压器空载的情况下, 分析了空投变压器的剩磁与合闸角、系统阻抗参数对和应涌流幅值及饱和速度的影响。文献[7-8]基于两台变压器并联运行的简化模型, 通过分析两台变压器磁链的相互影响关系, 认为和应涌流主要是由于相邻变压器空投涌流中的非周期分量流过系统电阻导致公共节点上电压的非周期波动所产生。针对运行变压器带负载运行, 文献

基金项目: 国家自然科学基金(U1134205); 中国铁路总公司重点科技项目(2015J005-A)

[9-10]定性分析了运行变压器负载对和应涌流的影响, 文献[11]针对运行变压器带有源和无源负载的两种情况, 得到了复杂和应涌流的磁链解析表达式, 总结了复杂和应涌流的影响因素、关键特征。在文献[12]分析了SS型机车变压器励磁涌流的发生以及影响因素, 但车型较旧, 仿真模型简单, 并未分析励磁涌流对同一供电区间机车的影响。针对电力机车还未见到关于车载变压器和应涌流现象的研究, 考虑到电力机车的位置和状态的时变性, 机车变压器的参数特性、动态特性与电力系统变压器有明显不同, 和应涌流现象将更为复杂。因此有必要开展此方面的工作, 为车网系统出现的异常跳闸现象提供参考。

1 电力机车和应涌流发生机理

牵引供电系统由牵引变电所(SS)、牵引网(TN)、分区所(SP)和电力机车(LM)等构成, 如图1所示。牵引变压器(TT)将电力系统三相电压转换成两路单相电压, 由接触网(T)和钢轨(R)为机车提供电能, 变电所出口处和分区所处设置有电分相(S0, S1)。

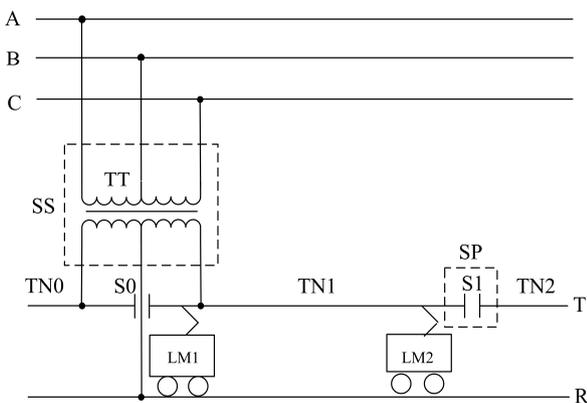


图1 牵引供电系统

Fig. 1 Traction power supply system

当机车LM1通过电分相进入牵引网TN1后变压器T1空载合闸, 此时如有机车LM2在牵引网TN1中运行, 合闸变压器T1产生的励磁涌流可能通过牵引网影响到运行机车的变压器, 合闸变压器T1与运行变压器T2在牵引网中运行的状态有4种, 如图2所示。

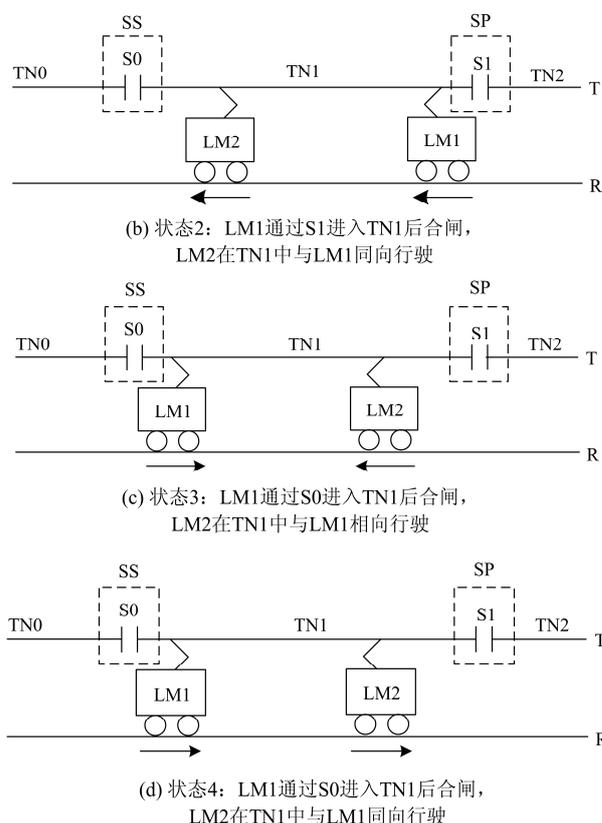
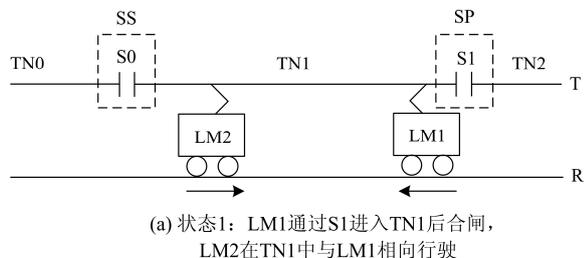


图2 机车LM1和LM2在牵引网运行状态

Fig. 2 Operation status of LM1 and LM2 in traction network

在图2的状态1和状态2中, LM1通过分区所的电分相驶向牵引变电所, LM2位于牵引变电所和LM1之间, 当变压器T1合闸时, 状态1和状态2均可等效为图3所示的电路。

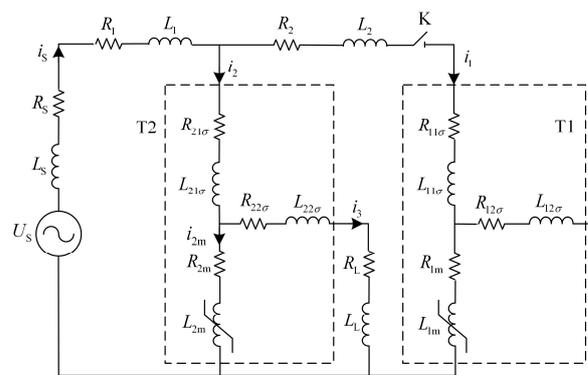


图3 状态1和状态2的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of status 1 and 2

图3中, $R_{11\sigma}$ 和 $L_{11\sigma}$ 、 $R_{12\sigma}$ 和 $L_{12\sigma}$ 为LM1变压器T1的一次侧和二次侧漏电阻、漏电感, R_{1m} 和 L_{1m} 为其励磁电阻和励磁电感, $R_{21\sigma}$ 和 $L_{21\sigma}$ 、 $R_{22\sigma}$ 和 $L_{22\sigma}$ 为LM2变压器T2的一次侧和二次侧漏电阻、漏电感, R_{2m} 和 L_{2m} 为其励磁电阻和励磁电感, R_L 和 L_L

为变压器 T₂ 二次侧负载电阻、电感, R₁、L₁ 为 LM2 与牵引变电所之间牵引网等效电阻、电感, R₂、L₂ 为 LM1 与 LM2 间牵引网等效电阻、电感, i_S 为牵

引变电所输出电流, i₁、i₂ 分别为变压器 T1 和 T2 一次侧电流, i₃ 为变压器 T2 二次侧电流。

根据图 3, 当开关 K 合闸时, 建立回路方程, 有:

$$\begin{cases} U_m \sin(\omega t + \theta) = (R_S + R_1)i_S + (R_{21\sigma} + R_{2m})i_{2m} + R_{21\sigma}i_3 + (L_S + L_1)di_S/dt + L_{21\sigma}(\frac{di_{2m}}{dt} + \frac{di_3}{dt}) + d\lambda_2/dt \\ (R_2 + R_{11\sigma} + R_{1m})i_1 + (L_2 + L_{11\sigma})\frac{di_1}{dt} + d\lambda_2/dt = (R_{21\sigma} + R_{2m})i_{2m} + R_{21\sigma}i_3 + L_{21\sigma}(\frac{di_{2m}}{dt} + \frac{di_3}{dt}) + d\lambda_2/dt \\ R_{2m}\frac{di_{2m}}{dt} + d\lambda_2/dt = (R_{21\sigma} + R_L)i_3 + (L_{21\sigma} + L_L)di_3/dt \\ i_S = i_1 + i_{2m} + i_3 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, λ₁、λ₂ 为变压器 T1、T2 磁链, 同样 令 λ₁ = L_{1m}i₁, λ₂ = L_{2m}i_{2m}, 代入式(1)得

$$\begin{cases} U_m \sin(\omega t + \theta) = (R_S + R_1)(\frac{\lambda_1}{L_{1m}} + \frac{\lambda_2}{L_{2m}} + i_3) + (R_{21\sigma} + R_{2m})\frac{\lambda_2}{L_{2m}} + R_{21\sigma}i_3 + (L_S + L_1) \cdot d(\frac{d\lambda_1}{dt \cdot L_{1m}} + \frac{d\lambda_2}{dt \cdot L_{2m}} + \frac{di_3}{dt}) + \\ L_{21\sigma}(\frac{d\lambda_2}{dt \cdot L_{2m}} + \frac{di_3}{dt}) + d\lambda_2/dt \\ (R_2 + R_{11\sigma} + R_{1m})\frac{\lambda_1}{L_{1m}} + (L_2 + L_{11\sigma} + L_{1m})\frac{d\lambda_1}{dt \cdot L_{1m}} = (R_{21\sigma} + R_{2m})\frac{\lambda_2}{L_{2m}} + R_{21\sigma}i_3 + L_{21\sigma}(\frac{d\lambda_2}{dt \cdot L_{2m}} + \frac{di_3}{dt}) + d\lambda_2/dt \\ R_{2m}\frac{d\lambda_2}{dt \cdot L_{2m}} + d\lambda_2/dt = (R_{21\sigma} + R_L)i_3 + (L_{21\sigma} + L_L)di_3/dt \end{cases} \quad (2)$$

由于式(2)存在积分, 直接求解较为复杂, 可通过 Laplace 变换将其变为频域表达式, 可得

$$\begin{cases} U_m \frac{s \sin \theta + \omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} = \frac{(R_S + R_1 + R_{21\sigma} + R_{2m}) + s(L_S + L_1 + L_{21\sigma} + L_{2m})}{L_{2m}} \cdot \lambda_2(s) - \\ \frac{L_S + L_1 + L_{21\sigma} + L_{2m}}{L_{2m}} \lambda_2(0) + \frac{(R_S + R_1) + s(L_S + L_1)}{L_{1m}} \lambda_1(s) - \frac{L_S + L_1}{L_{1m}} \lambda_1(0) + \\ (R_S + R_1 + R_{21\sigma} + s(L_S + L_1 + L_{21\sigma}))i_3(s) - (L_S + L_1 + L_{21\sigma})i_3(0) \\ \frac{(R_2 + R_{11\sigma} + R_{1m}) + s(L_2 + L_{11\sigma} + L_{1m})}{L_{1m}} \lambda_1(s) - \frac{L_2 + L_{11\sigma} + L_{1m}}{L_{1m}} \lambda_1(0) = \frac{(R_{21\sigma} + R_{2m}) + s(L_{21\sigma} + L_{2m})}{L_{2m}} \lambda_2(s) - \frac{L_{21\sigma} + L_{2m}}{L_{2m}} \lambda_2(0) + \\ (R_{21\sigma} + sL_{21\sigma})i_3(s) - L_{21\sigma}i_3(0) \\ (\frac{R_{2m}}{L_{2m}} + s)\lambda_2(s) - \frac{1}{L_{2m}}\lambda_2(0) = ((R_{22\sigma} + R_L) + s(L_{22\sigma} + L_L))i_3(s) - (L_{22\sigma} + L_L)i_3(0) \end{cases} \quad (3)$$

通过式(3)可得到磁链 λ₁(s)、λ₂(s) 的频域解, 再对其进行 Laplace 反变换, 即可得磁链 λ₁(t)、λ₂(t) 的时域解析解, 从而求得电流 i₁(t)、i₂(t) 的表达式, 形式如式(4)。

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \alpha) + A_2 e^{-t/\tau_1} + A_3 e^{-t/\tau_2} + A_4 e^{-t/\tau_3} \\ \lambda_2(t) = B_1 \sin(\omega t + \beta) + B_2 e^{-t/\tau_1} + B_3 e^{-t/\tau_2} + B_4 e^{-t/\tau_3} \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ₁、τ₂ 由系统参数(R_S、L_S)、牵引网阻抗参数(R₁、R₂、L₁、L₂)、机车变压器阻抗参数以及机车 LM2 负载(R_L、L_L)决定, τ₃ 则由变压器参数决定; A₁、A₂、A₃ 和 B₁、B₂、B₃ 则与系统、线路、变压器等参数以及合闸角、变压器剩磁等有关。

由式(4)可知, 合闸变压器 T1 的磁链 λ₁ 增加了多项衰减的非周期分量, 而运行变压器 T2 则在稳态励

磁基础上增加了多项非周期暂态分量, 表明合闸变压器T1与运行变压器T2的磁链之间可通过系统侧电阻和牵引网阻抗相互影响, 变压器T1合闸后自身的磁链可能会发生饱和, 同时还可能造成变压器T2的磁链出现饱和, 从而使运行变压器T2出现涌流。

在状态3和状态4下, 机车LM1通过变电所处的电分相后驶离变电所, LM1位于牵引变电所和LM2之间, 当LM1变压器T1合闸时, 状态3和状态4的等效电路如图4所示。

在图4中, R'_1 、 L'_1 为LM2与牵引变电所之间的牵引网等效电阻、电感, R'_2 、 L'_2 为LM1与LM2间的牵引网等效电阻、电感, 其他参数定义与图3相同。

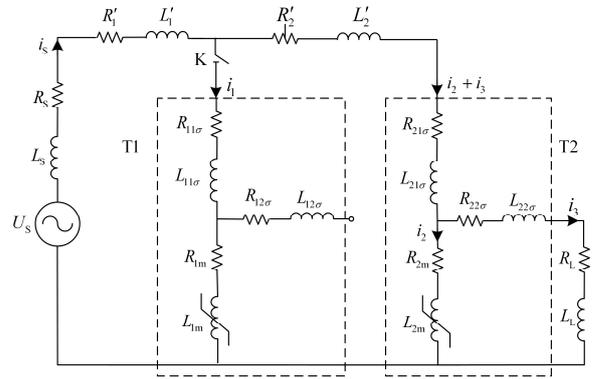


图4 状态3和状态4等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of status 3 and 4

当开关K合闸时, 建立回路方程, 有

$$\begin{cases} u_s = (R_s + R'_1)i_s + (R_{11\sigma} + R_{1m})i_1 + (L_s + L'_1)di_s/dt + L_{11\sigma}di_1/dt + d\lambda_1/dt \\ (R_{11\sigma} + R_{1m})i_1 + L_{11\sigma}di_1/dt + d\lambda_1/dt = (R'_2 + R_{21\sigma} + R_{2m})i_{2m} + (R'_2 + R_{21\sigma})i_3 + (L'_2 + L_{21\sigma})(di_{2m}/dt + di_3/dt) + d\lambda_2/dt \\ R_{2m}i_{2m} + d\lambda_2/dt = (R_{21\sigma} + R_L)i_3 + (L_{21\sigma} + L_L)di_3/dt \\ i_s = i_1 + i_{2m} + i_3 \end{cases} \quad (5)$$

将 $\lambda_1 = L_{1m}i_1$, $\lambda_2 = L_{2m}i_{2m}$ 代入式(5), 可得

$$\begin{cases} U_m \sin(\omega t + \theta) = (R_s + R'_1 + R_{11\sigma} + R_{1m})\frac{\lambda_1}{L_{1m}} + (R_s + R'_1)(\frac{\lambda_2}{L_{2m}} + i_3) + (L_s + L'_1 + L_{11\sigma} + L_{1m})\frac{d\lambda_1}{dt \cdot L_{1m}} + (L_s + L'_1)(\frac{d\lambda_2}{dt \cdot L_{2m}} + \frac{di_3}{dt}) \\ (R_{11\sigma} + R_{1m})\frac{\lambda_1}{L_{1m}} + (L_{11\sigma} + L_{1m})\frac{d\lambda_1}{dt \cdot L_{1m}} = (R'_2 + R_{21\sigma} + R_{2m})\frac{\lambda_2}{L_{2m}} + (R'_2 + R_{21\sigma})i_3 + (L'_2 + L_{21\sigma} + L_{2m})\frac{d\lambda_2}{dt \cdot L_{2m}} + (L'_2 + L_{21\sigma})\frac{di_3}{dt} \\ R_{2m}\frac{\lambda_2}{L_{2m}} + d\lambda_2/dt = (R_{21\sigma} + R_L)i_3 + (L_{21\sigma} + L_L)di_3/dt \end{cases} \quad (6)$$

同样, 对式(6)进行Laplace变换求得 $\lambda_1(s)$ 、 $\lambda_2(s)$ 后再进行Laplace反变换即可求得 λ_1 、 λ_2 的时域表达式, 此处不再列举。

2 仿真分析

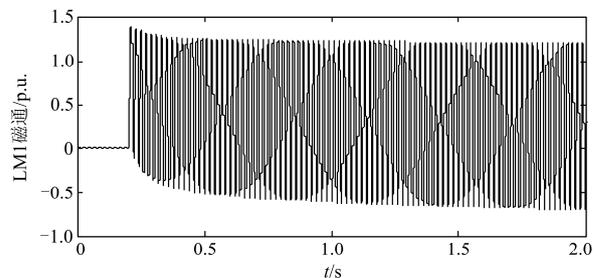
为分析运行机车变压器和应涌流发生机理以及影响涌流大小的因素, 建立牵引供电系统—电力机车合闸仿真模型, 分析不同条件下机车LM2变压器的和应涌流。仿真模型中, 牵引变压器为单相变压器, 容量为31.5 MVA, 牵引网长度为25 km, LM1与LM2型号均为HXD3型, 其变压器额定容量为9006 kVA, 高压侧牵引网额定电压为25 kV, 牵引侧为1450 V, 阻抗电压百分比为41%, 空载电流为0.26%, 空载损耗为2600 W, 负载损耗为224 kW^[13]。

2.1 励磁涌流与和应涌流

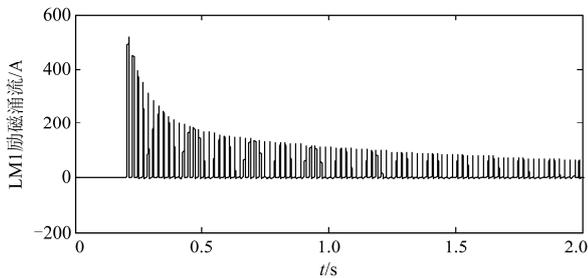
2.1.1 机车LM1牵引网末端合闸

首先分析机车LM1在牵引网末端合闸的情况, 对应图2中状态1和状态2, 假设此时机车LM2与机

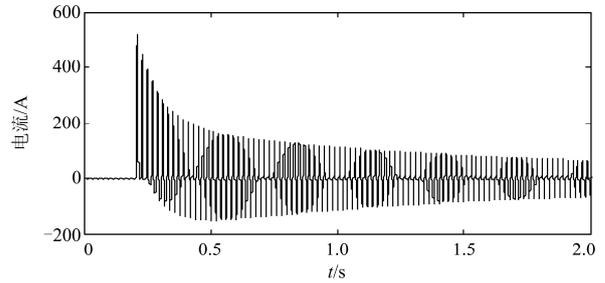
车LM1的距离为1 km, 空载运行, LM1变压器合闸时间设为0.2 s, 合闸初相角为0°, LM1变压器合闸后, LM1、LM2变压器磁通、电流变化情况如图5(a)、(b)、(c)、(d)所示; LM1的励磁涌流与LM2和应涌流中的非周期直流分量如图5(e)所示; 对LM2和应涌流进行FFT分析, 得到其各次电流值, 如图5(f)所示; 牵引变电所处的馈线电流为LM1和LM2电流的叠加值, 如图5(g)所示; LM2位置处牵引网直流电压值如图5(h)所示。



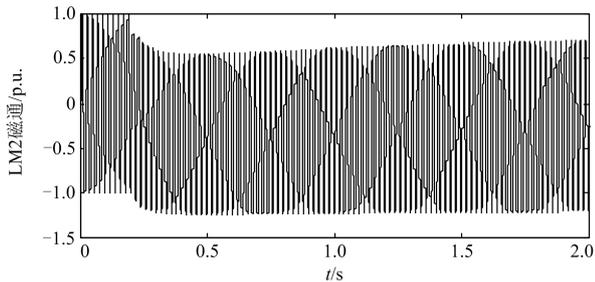
(a) LM1 变压器T1磁通



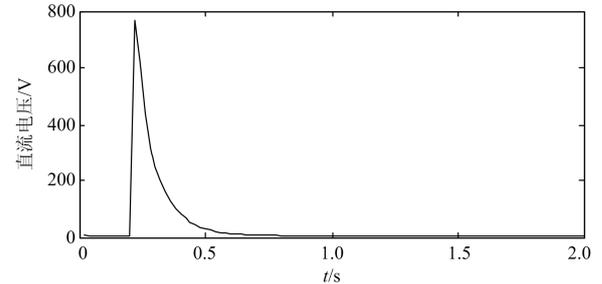
(b) LM1变压器T1励磁涌流



(g) 牵引变电所处馈线电流



(c) LM2变压器T2磁通



(h) LM2所在位置牵引网直流电压

图5 LM1变压器T1末端合闸

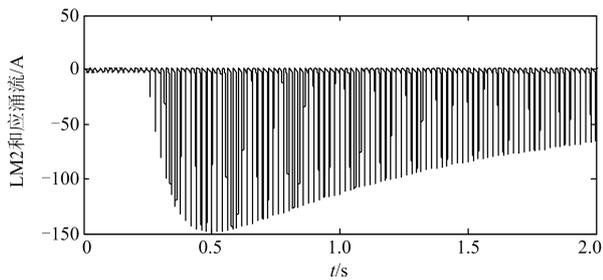
Fig. 5 Transformer T1 of LM1 closing in the end of line

由图5可知:

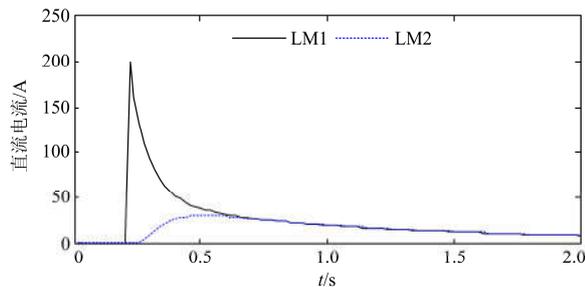
1) LM1变压器T1合闸产生的励磁涌流为518 A,基本与LM1在牵引网中单独运行时的励磁涌流相同,但受LM2磁链的影响,LM1的磁链和励磁涌流的衰减时间更长。

2) LM1的励磁涌流 i_1 中非周期分量与牵引网电阻 R_1 与系统侧电阻 R_S 共同作用造成机车LM2所在位置牵引网电压出现很高的直流电压 V_D ,直流电压 V_D 造成LM2变压器T2产生负向偏磁,此时,负向偏磁出现初期,变压器T2还未达到饱和,励磁阻抗很大,励磁电流很小;在励磁涌流 i_1 的影响下,变压器T2负向偏磁逐渐积累, $|\Delta\lambda_2| > 0$,在变压器T1合闸0.06 s后,变压器T2进入饱和,开始出现与励磁涌流反向的和应涌流 i_2 ,并逐渐增大,在变压器T1合闸0.3 s后,变压器T2的磁链 λ_2 达到负向最大,和应涌流 i_2 也达到最大,此后磁链 λ_2 与和应涌流 i_2 进入衰减阶段,由图5(f)可以看出,和应涌流 i_2 中出现了超过基波的直流分量,谐波分量中二次谐波含量最高,三次谐波次之。

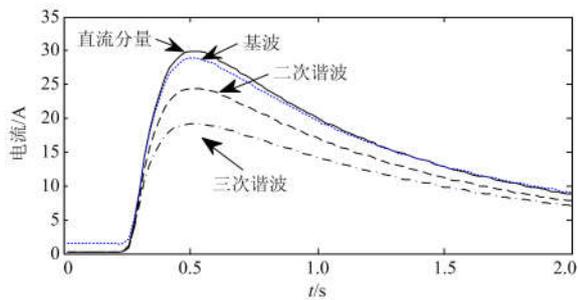
3) 在变压器T2的和应涌流 i_2 增大过程中, i_2 中直流分量也逐渐增大,达到最大值时与励磁涌流 i_1 中的直流分量大小基本相同,方向相反,可以认为使得牵引网直流电压为零,变压器T2和应涌流的不断增大,造成反向直流电压 V_{D2} 也不断增大用以抵消励磁涌流造成的正向直流电压 V_{D1} ,当 $|V_{D2}| = |V_{D1}|$,



(d) LM2变压器T2和应涌流



(e) LM1与LM2电流中非周期直流分量



(f) LM2各次电流分量

即牵引网直流电压 V_D 为零时, 和应涌流 i_2 达到最大, 此后开始衰减。

2.1.2 机车LM1在牵引网首端合闸

机车LM1通过电分相S0后在牵引网首端合闸, 对应图2中状态3和状态4, 同样假设此时机车LM2与机车LM1的距离为1 km, 空载运行, 此时LM1、LM2变压器的电流如图6所示, LM1变压器合闸时间设为0.2 s, 合闸初相角为 0° 。

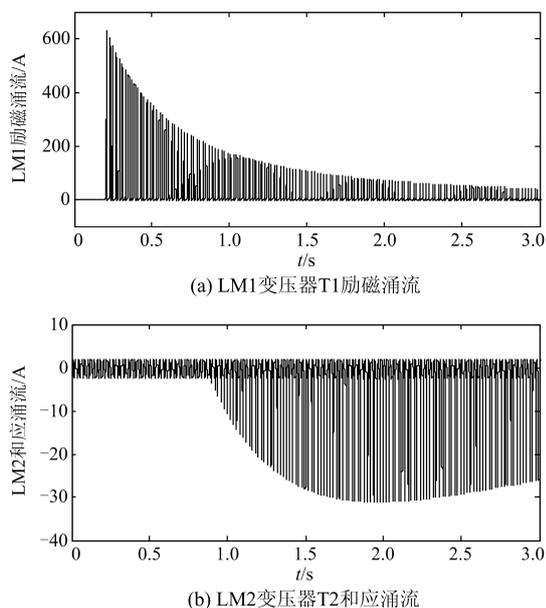


图6 LM1变压器T1首端合闸

Fig. 6 Transformer T1 of LM1 closing in the head of line

由图6可以看出, LM1变压器T1在首端合闸时励磁涌流高于其在末端合闸时, 在其合闸0.6 s后, LM2变压器T2开始饱和, 出现和应涌流 i_2 , 并在变压器T1合闸1.66 s后, 和应涌流 i_2 达到负向最大, 仅有31.1 A, 小于变压器T1在末端合闸时变压器T2的和应涌流; 由于变压器T1在牵引网首端合闸时, 变压器T1的励磁涌流 i_1 中的直流分量仅作用于系统侧电阻 R_S , 造成的直流电压较小, LM2处的牵引网直流电压 V_D 仅为78.5 V, 远小于LM1在末端合闸时的LM2处的牵引网直流电压, 因此变压器T2的负向偏磁小, 达到饱和的时间也变长, 其只需产生较小的和应涌流即可抵消励磁涌流造成的牵引网直流电压。

由于LM1在牵引网首端合闸对LM2影响较小, 因此在以下分析中只考虑LM1在末端合闸的情况。

2.2 LM2与LM1距离的影响

上述分析中假设LM2与LM1相距1 km, 但在实际线路中, LM1合闸时, LM2在牵引网中的位置是不确定的, 因此分析LM2与LM1的距离对和应涌流

的影响, 如图7所示; LM2位置处牵引网电压的直流分量如图8所示。

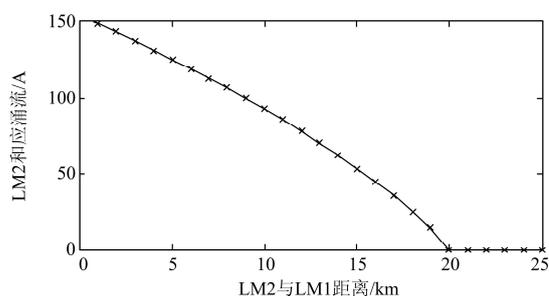


图7 LM2与LM1距离不同时LM2和应涌流

Fig. 7 Sympathetic inrush of LM2 with different distances between LM1 and LM2

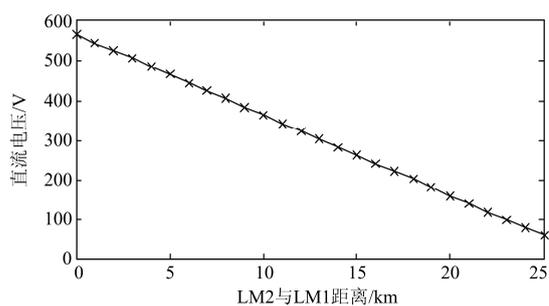


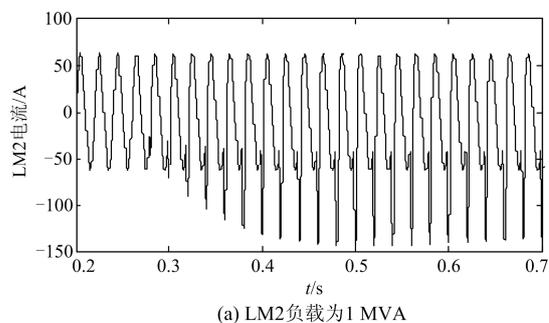
图8 不同距离时牵引网电压直流分量

Fig. 8 DC voltages of traction network with different distances between LM1 and LM2

由图7、图8可知, LM2和应涌流大小与LM1距离有关, LM2与LM1距离越近, 受LM1的励磁涌流影响越大, 所在位置的牵引网中直流电压也越高, 造成LM2变压器T2更快进入饱和, 饱和度更深, 产生的和应涌流也越大, 而当LM2与LM1距离超过20 km时, 其所在位置的牵引网直流电压很小, 未造成LM2变压器T2磁链饱和, LM2未出现和应涌流。

2.3 LM2带有负载的影响

考虑LM2在负载情况下, LM1变压器T1励磁涌流对LM2的影响, LM2的负载分别设为1 MVA、2 MVA、5 MVA, LM1合闸后LM2电流如图9所示。



(a) LM2负载为1 MVA

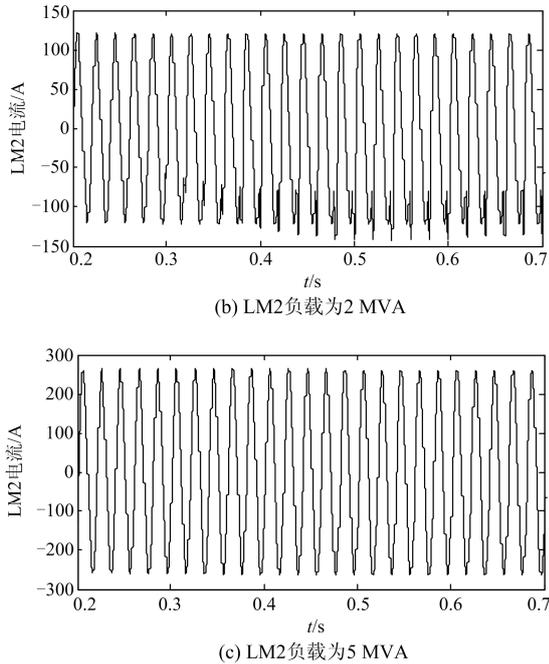


图 9 不同负载时LM2的电流

Fig. 9 Currents of LM2 with different loads

由图9可知，LM1合闸后，LM2电流为负载电流与和应涌流的叠加，当LM2的负载电流较高时，和应涌流的特征将不再突出，但LM2电流存在一定程度的畸变，畸变程度与和应涌流和负载电流大小有关。

对不同负载下的LM1励磁涌流和LM2和应涌流进行分析，如表1所示。

表 1 不同负载时LM1励磁涌流与LM2和应涌流
Table 1 Inrush current and sympathetic inrush with different loads

| | different loads | | | | |
|---------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | 无负载 | 1 MVA | 2 MVA | 5 MVA | 9 MVA |
| LM1 励磁涌流/A | 518 | 510 | 497 | 440 | 391 |
| LM2 和应涌流/A | 148.8 | 137.5 | 121.5 | 60.7 | — |
| 最大值 出现时刻/s | 0.5 | 0.52 | 0.56 | 0.68 | — |

由表1可以看出，由于在LM2的负载电流影响下牵引网电压降低，造成了LM1励磁涌流变小，LM2的负载越大，励磁涌流造成的变压器T2磁链的饱和度越浅，达到饱和点的速度也变慢，和应涌流最大幅值和出现的时间也越晚，当负载增大到一定程度时，运行变压器不会出现饱和，也不会出现和应涌流现象。

2.4 变压器容量的影响

由于牵引网运行机车的不确定性，线路上可能

运行不同容量的电力机车，分析 LM1 变压器 T1 和 LM2 变压器 T2 分别具有不同容量时，LM2 变压器 T2 受 LM1 变压器 T1 合闸的影响，如图 10 所示。

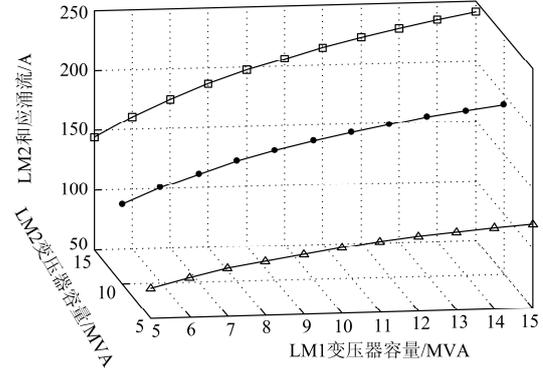


图10 不同容量下LM2和应涌流

Fig. 10 Sympathetic inrush of LM2 with different transformers' capacity

由图10可知，在LM2变压器T2容量不变时，LM1变压器T1容量越大，其合闸产生的励磁涌流越大，造成LM2的和应涌流也越大；而当LM1变压器T1容量不变时，其合闸产生的励磁涌流不变，LM2变压器T2容量越大，其和应涌流也越大，表明在相同非周期直流电压影响下，变压器T2容量越大，其磁链饱和度越高，和应涌流现象更易出现。

2.5 LM1 变压器 T1 剩磁的影响

由于电力机车过电分相时间短，变压器中可能存有剩磁，因此分析变压器 T1 不同剩磁时 LM1 励磁涌流与 LM2 和应涌流，如图 11 所示。

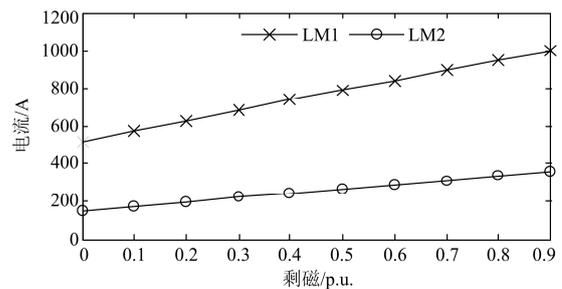


图 11 不同剩磁时 LM1 励磁涌流与 LM2 和应涌流

Fig. 11 Sympathetic inrush of LM2 with different remanence of LM1

由图11可以看出，变压器T1剩磁越高，其合闸时产生的励磁涌流也越大，涌流造成的牵引网电压的直流分量也越高，从而影响到LM2变压器T2产生的和应涌流也越大。

2.6 阻抗电压百分比的影响

由于线路运行的电力机车有多种型号，不同型

号的机车变压器阻抗电压百分比不同, 因此分析 LM1 变压器与 LM2 变压器不同阻抗电压百分比情况下 LM2 和应涌流变化情况, 如图 12 所示。

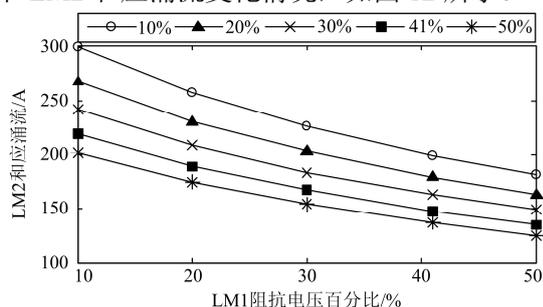


图12 不同阻抗电压百分比下LM2和应涌流

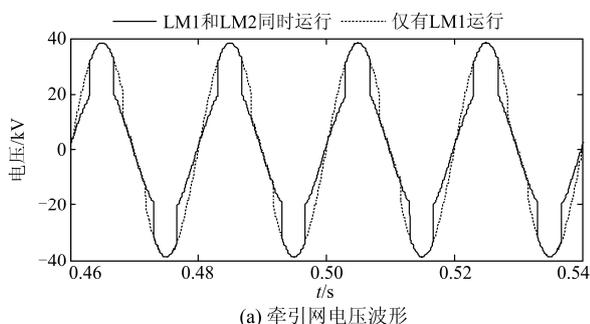
Fig. 12 Sympathetic inrush of LM2 with different impedance voltage percentages

由图12可知, LM1变压器T1的阻抗电压百分比越小, 其对LM2影响越大, LM2和应涌流也越大; 而在外部条件相同时, LM2变压器T2的抗电压百分比越小, 越易受到牵引网直流分量的影响, 磁链越容易达到饱和, 产生的和应涌流也越大。

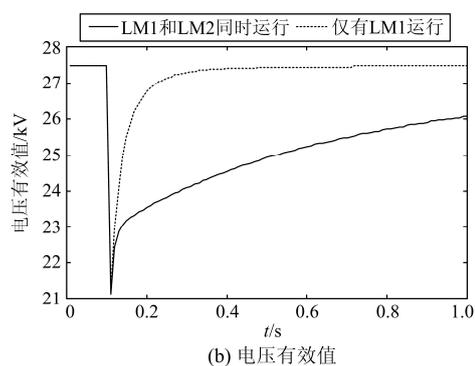
2.7 涌流对电压的影响

假设机车 LM1 容量为 10 MVA, 剩磁为 0.5 p.u., 阻抗电压百分比为 10%, 牵引网末端合闸, 机车 LM2 容量为 10 MVA, 阻抗电压百分比为 10%, 与机车 LM1 相距 1 km 处空载运行, 机车 LM1 合闸后的励磁涌流最大值达到 1302.6 A, 为其额定电流峰值的 2.54 倍, 机车 LM2 和应涌流最大值为 559 A, 超过其额定电流峰值, 分析涌流对牵引网电压的影响, 如图 13 所示。

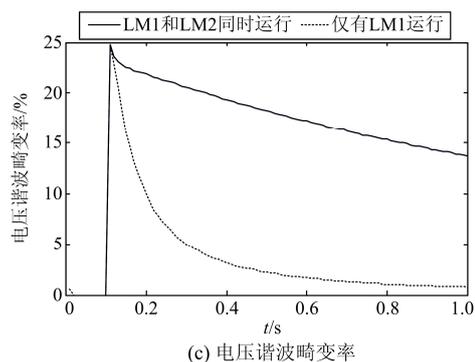
由图 13 可以看出, 机车 LM1 合闸后其励磁涌流造成牵引网电压发生严重跌落和畸变, 牵引网电压降为 21.22 kV, 谐波畸变率达到 25%, 当牵引网中只有机车 LM1 运行时, 励磁涌流衰减很快, 牵引网电压会迅速恢复到额定值, 谐波畸变率也迅速下降, 但当牵引网中还有 LM2 运行时, 其产生的和应涌流同样造成了牵引网电压的跌落和畸变, 而 LM1



(a) 牵引网电压波形



(b) 电压有效值



(c) 电压谐波畸变率

图13 机车LM2位置处牵引网电压

Fig. 13 Traction network voltage in the location of LM2

的励磁涌流衰减速度也变慢, 在和应涌流与励磁涌流的共同作用下, 牵引网电压恢复时间与谐波畸变率衰减时间更长。

3 结论

通过数学分析、建模仿真, 可以得到以下结论:

1) 机车变压器在牵引网中合闸产生的励磁涌流与牵引网阻抗与系统阻抗共同作用造成牵引网电压出现非周期的直流分量, 同一供电区间的运行变压器受牵引网非周期直流电压的影响产生负向偏磁, 造成变压器饱和, 出现负向和应涌流, 快速增大到最大值后开始缓慢衰减。

2) 运行变压器负向偏磁与和应涌流的大小与其所在位置牵引网电压非周期分量的大小成正比, 而合闸变压器的容量、剩磁越大, 阻抗电压百分比越小, 其产生的励磁涌流也越大, 造成的牵引网电压非周期分量也越高, 对运行变压器的影响也越大, 同样, 运行变压器距离合闸变压器越近, 和应涌流就越大; 运行变压器容量越大、阻抗电压百分比越小, 越易受到合闸变压器励磁涌流造成的牵引网电压非周期分量的影响, 变压器越易达到饱和, 产生的和应涌流也越大。

3) 合闸机车产生的励磁涌流会造成牵引网电

压发生严重跌落和畸变,运行机车变压器和应涌流出现后造成了牵引网电压进一步跌落和谐波畸变率的增大,延缓了牵引网电压的恢复过程。

参考文献

[1] 张雪松,何奔腾,张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 15-19.
ZHANG Xuesong, HE Benteng, ZHANG Jiansong. Principle and influencing factors of the transformer sympathetic inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-19.

[2] 凌光,苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.

[3] 邵文权,乔妮,王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.

[4] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.

[5] 傅伟,赵莉华,梁勇,等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.

[6] 毕大强,王祥珩,李德佳,等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 1-8.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, LI Dejia, et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8.

[7] 龚薇,刘俊勇,贺星棋. 电网恢复初期和应涌流产生机理及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 44-50.
GONG Wei, LIU Junyong, HE Xingqi. Analysis of the generation mechanism and influencing factors on sympathetic inrush in initial period of power system

restoration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 44-50.

[8] 武万才,边疆,吴志勇. 变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 112-115.
WU Wancai, BIAN Jiang, WU Zhiyong. Principle and characteristics of transformer sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 112-115.

[9] 张雪松,何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 12-17.
ZHANG Xuesong, HE Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 12-17.

[10] 王阳光,尹项根,游大海. 影响变压器和应涌流的各种因素[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 78-85.
WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai. The influencing factors on sympathetic inrush phenomena in transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 78-85.

[11] 金明亮,尹项根,游大海. 复杂和应涌流导致差动保护误动的原因与对策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 86-93.
JIN Mingliang, YIN Xianggen, YOU Dahai. Reason of differential protection mal-operation caused by complex sympathetic inrush and its countermeasure[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 86-93.

[12] 马果,吴广宁,王韬,等. 电力机车励磁涌流仿真及其对公网影响的分析[J]. 电气化铁道, 2010, 21(1): 1-4.
MA Guo, WU Guangning, WANG Tao, et al. Electric locomotive inrush current simulation and analysis of its impact on public grid[J]. Electric Railway, 2010, 21(1): 1-4.

[13] 杨朝晖,杨守君. HX_D3 型交流传动货运电力机车主变压器[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(6): 5-7.
YANG Zhaohui, YANG Shoujun. Main transformer for type HXD3 AC drive freight electric locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2009, 32(6): 5-7.

收稿日期: 2016-06-07

作者简介:

赵元哲(1987—),男,博士,主要研究方向为牵引供电系统电能质量分析与治理、车网异常电磁暂态研究; E-mail: yuanzhezhaoy@gmail.com

李群湛(1957—),男,博士,教授,博导,研究方向为牵引供电系统理论、电能质量与控制等; E-mail: lqz3431@263.net

周福林(1982—),男,通信作者,博士,讲师,研究方向为车网耦合、电能质量等。E-mail: zhoufulin940@sina.com

(编辑 魏小丽)