



基于自适应阻抗匹配网络的电缆贯通供电系统综合补偿策略研究

孙伟¹, 马斌¹, 冯锦炜², 王帅²

(1. 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062350;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对传统电缆贯通供电系统中电缆容性无功引起的沿线电压抬升过高问题, 文章提出一种自适应匹配系统电缆无功阻抗的综合补偿策略。首先, 建立了含阻抗匹配网络的电缆贯通供电系统模型, 分析了牵引变电所的负序传播机理和电压抬升抑制原理, 基于功率解耦推导了负序补偿的端口参考电流公式。然后, 提出分层控制策略, 在优化计算层中采用满意补偿优化补偿装置容量, 降低成本, 并对补偿电流和阻抗匹配网络的晶闸管触发角进行计算。控制层对潮流控制器进行电流跟踪以实现快速控制, 同时调节晶闸管通断时长改变网络等效阻抗, 从而自适应匹配系统无功需求, 实现无功连续补偿与沿线电压调节。最后, 仿真和Star Sim半实物试验均验证了所提补偿策略的有效性与正确性。

关键词: 电缆贯通供电; 自适应; 阻抗匹配; 负序补偿; 无功补偿; Star Sim

中图分类号: U223

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0094-09

0 引言

目前, 我国西部地区铁路沿线电网基础薄弱, 接入点稀少^[1], 呈现出以“低短路比”为特征的“薄弱电网”特性。该电网对电能质量变化较为敏感, 在险峻路段, 电力机车峰值功率大且功率波动频繁, 进一步加剧了负序问题。传统牵引供电系统中, 单个牵引变电所供电范围有限, 单个牵引供电臂长度通常不超过25 km^[2], 难以满足西部地区远距离牵引供电的实际需求。

针对上述问题, 西南交通大学李群湛教授提出了牵引变电所群供电的方案^[3], 利用公共连接点(PCC)的单相高压牵引电缆作为输电介质, 通过单相牵引变压器向多个牵引变电所供电, 单相变压器无须在变电所出口设置电分相, 具有更强的供电能力和更远的供电距离。然而, 由于电缆自身突出的电容效应, 系统的

无功分布变得更为复杂, 在电网薄弱地区易引发沿线电压抬升及中心所功率因数下降等问题。在其他国家的相关研究中, 德国采用专供铁路的单相发电厂, 无电分相也无负序问题, 但投资过高, 难以应用于长距离线路^[4]。日本学者利用功率调节器进行功率调度以改善电能质量, 但未解决电分相问题^[5-6]。俄罗斯则采用双边供电技术, 省去了分区所的电分相^[4], 但也带来了保护配合与电能计费等问题。

采用Scott牵引变压器和V/v变压器均可有效改善负序影响并提高功率因数^[7-10]。近年来, 基于功率潮流控制器(PFC)的方案也相继被提出, 用于进一步治理负序及无功问题^[11]。文献[12]提出一种基于并联电抗器和无功静止发生器(SVG)的混合补偿方案, 实现了电缆同相贯通供电系统的综合补偿, 但受电抗器性能限制, 该方案补偿灵活性较弱, 连续补偿能力不足, 在远距离牵引供电的综合补偿方面能力有限。文献[13]讨论了不同耦合阻抗对调节器性能的影响, 提出了一种自适

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51877182)

通信作者: 王帅, 男, 博士, 助理研究员, 主要从事牵引供电和牵引网保护方面的研究; E-mail: 2656907229@qq.com

引用格式: 孙伟, 马斌, 冯锦炜, 等. 基于自适应阻抗匹配网络的电缆贯通供电系统综合补偿策略研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 94-102. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.301.

Citation: SUN Wei, MA Bin, FENG Jinwei, et al. Research on a comprehensive compensation strategy for continuous cable traction power supply system based on adaptive impedance matching network[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 94-102. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.301.

应阻抗耦合混合功率质量调节器(AI-HPQC), 以实现系统综合补偿。文献[14]提出了一种基于自适应阻抗的晶闸管控制阻抗匹配网络(TCIMN), 进一步提高了从功率放大器到负载的补偿效率。

基于上述分析, 本文针对电缆贯通供电系统在薄弱电网条件下的运行特点, 提出一种具备自适应补偿能力的电缆无功综合补偿策略。与传统的电缆无功补偿方法不同, 该方案采用阻抗匹配网络替代并联电抗器, 实现电缆电压的灵活无功调控, 并引入满意补偿策略优化负序补偿容量。在此基础上, 通过分层控制实现系统电能质量的综合补偿。仿真和半实物试验结果表明, 所提补偿策略在提升系统电能质量方面具有良好的效果。

1 电缆贯通供电系统结构

电缆贯通供电系统由一个主牵引变电所(MTS)与多个单相牵引变电所组成, 如图1所示。其中, $\dot{i}_{ABC}$ 、 $\dot{i}_{ABC_T}$ 、 $\dot{i}_{ABC_H}$ 分别为电网侧、主牵引变电所和单相高压电缆的三相电流, α 、 β 、 T 分别为电网侧、牵引网侧和主变压器侧端口, I_α 、 I_β 、 I_T 分别为各端口电流, U_α 、 U_β 、 U_T 分别为各端口电压。

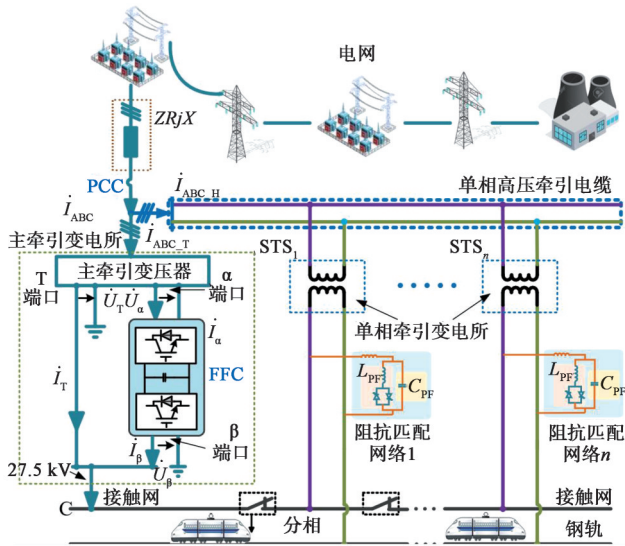


图1 电缆贯通供电模型结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the continuous cable power supply model

由图1可知, 多个牵引变电所(STS_1 、 STS_2 、 $\dots$ 、 STS_n)通过单相高压牵引电缆供电, 在电网公共连接点(PCC)处连接三相电压的两相。每个牵引变电所内的单相牵引变压器(TT)与阻抗匹配网络相连, 系统结构简单, 容量利用率高。各牵引变电所牵引网电压相位相同, 从而取消了中性段(NS), 实现了连续供电。

阻抗匹配网络由耦合电感 L_C 、并联电容 C_{PF} 与带串联电感 L_{PF} 的晶闸管控制电抗器(TCR)组成, 通过控制晶闸管的触发角 α 改变其等效阻抗, 使其系统中产生的

无功功率自适应匹配, 从而实现电缆沿线电压的自适应调节。

主牵引变电所由主牵引变压器和潮流控制器(PFC)共同构成, 其中, 主牵引变压器可根据实际需求配置为V/v接线或Scott接线变压器。该系统在电缆沿线电压得到初步调控的基础上, 对系统中的负序与剩余无功进行集中补偿, 以确保功率因数与负序指标满足标准要求。

2 综合补偿数学描述

2.1 牵引变电所负序传播机理

为了分析不同负载电流在PCC处对负序的影响, 以图1中A相电压为参考相位, 根据电网侧电流与牵引侧电流的电气关系, 系统在PCC处的负序电流 $\dot{i}_{-A}$ 可表示为

$$\dot{i}_{-A} = \dot{i}_{-A_H} + \dot{i}_{-A_L} + \dot{i}_{-A_a} + \dot{i}_{-A_b} \quad (1)$$

$\dot{i}_{-A_L}$ 、 $\dot{i}_{-A_a}$ 和 $\dot{i}_{-A_b}$ 分别为负载端电流、 α 端口电流和 β 端口电流在PCC处引起的负序电流, 如式(2)。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{-A_a} \\ \dot{i}_{-A_b} \\ \dot{i}_{-A_L} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} K_\alpha e^{j2\psi_\alpha - \varphi_\alpha} \\ K_T e^{j2\psi_T - \varphi_\beta} \\ K_T e^{j2\psi_T - \varphi_L} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_\alpha \\ -I_\beta \\ I_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: I_α 、 I_β 、 I_L 分别为 α 端、 β 端和负载端电流的幅值; K_α 、 K_T 分别为 α 端和T端变压器二次侧与一次侧相电压幅值之比; φ_α 、 φ_β 、 φ_L 分别为对应 α 端、 β 端和负载端电流的功率因数角; ψ_α 、 ψ_T 分别为对应 α 端和T端变压器的接线角。

式(2)适用于不同TT接线下的对称电网。

$\dot{i}_{-A_H}$ 为单相高压牵引电缆电流在PCC处产生的负序电流, 可表示为

$$\dot{i}_{-A_H} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}^T \dot{i}_{-ABC_H} \quad (3)$$

式中: a 为相角因子, $a = e^{j120^\circ}$; $\dot{i}_{-ABC_H}$ 为三相电流。

故PCC处的电压不平衡度(VU)值 A_{VU} 为

$$A_{VU} = \frac{100 \sqrt{3} U_s |\dot{i}_{-A}|}{S} \quad (4)$$

式中: S 为PCC处短路容量, MVA; U_s 为PCC处线电压, kV。

由图1和式(1)~式(4)可知, 电缆电流同样会在PCC处产生负序电流, 若不加以补偿, 系统的电压不平衡度将进一步加剧。

2.2 电压抬升和抑制原理

在牵引供电系统中, 机车的运行将进一步影响系统的无功功率分布。根据电缆牵引供电系统的简化等效电路^[12], 补偿前后电缆沿线节点的电压与电流向量

关系如图2和图3所示。其中, $\dot{I}_c$ 为电缆分布电容产生的容性电流, $\dot{I}_1$ 为末端节点电流, $\dot{I}_0$ 为初始节点电流, $\dot{U}_1$ 为末端节点电压, $\dot{U}_0$ 为初始节点电压, $\dot{I}_{lb}$ 为阻抗网络产生的感性电流。

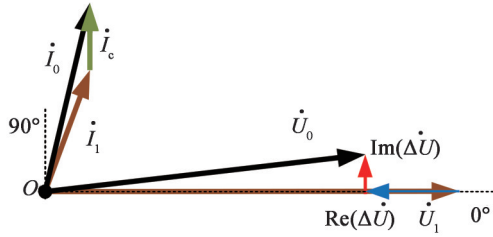


图2 补偿前节点电压电流向量图

Fig. 2 Vector diagram of node voltage and current before compensation

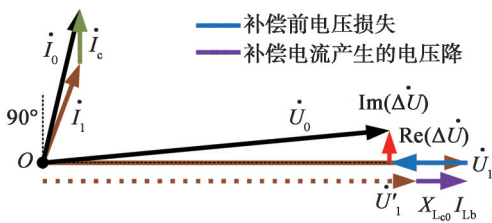


图3 补偿后节点电压和电流向量图

Fig. 3 Vector diagram of node voltage and current after compensation

当系统空载运行时, 线路电流呈现容性特征, 导致沿线电压抬升, 且越接近线路末端, 电压容升现象越明显。此时阻抗网络产生的感性电流与之相抵消, 从而抑制电压抬升。

2.3 PFC补偿原理

为满足电能质量相关标准对电压不平衡度的要求^[15], 基于功率守恒原理和系统潮流分析, 将电缆贯通供电系统中潮流控制器(PFC)的补偿量划分为有功电流补偿与无功电流补偿两部分。

2.3.1 有功电流补偿

PFC对两侧负序电流进行有功补偿, 以实现两侧有功电流平衡。有功补偿电流 I_{ap} 和 I_{bp} 关系如下:

$$\begin{bmatrix} I_{ap} \\ I_{bp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_T}{K_a} - \frac{K_T}{K_a} \\ 1 \quad -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Lp} \\ I_{Tp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: I_{Lp} 为流过接触网端口电流的有功分量; I_{Tp} 为流过T端口电流的有功分量。

由式(5)可知, PFC在电网侧和牵引网侧的有功补偿量分别由 α 端口和T端口承担。

2.3.2 无功电流补偿

PFC除实现负序治理外, 还对中心所的功率因数进行补偿, 以满足功率因数不低于0.9, 避免考核不达标。其无功补偿电流 I_{aq} 、 I_{bq} 关系如下:

$$\begin{bmatrix} I_{aq} \\ I_{bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_T}{K_a} \sqrt{\cos^{-2}\varphi - 1} & \frac{K_T}{K_a} \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Lp} \\ I_{Tp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\cos\varphi$ 为功率因数; I_{Tq} 为流过T端口电流的无功分量。

电缆沿线电压约束与中心所功率因数约束之间并无直接的数学关联。当沿线电压满足要求时, 中心所的功率因数未必能满足限值要求, 此时由PFC进行二级补偿, 保证二者同时满足系统安全与经济运行需求。

上述 I_{Tp} 、 I_{Tq} 分别为流过T端口电流的有功分量和无功分量, 可表述为:

$$\left. \begin{aligned} I_{Tp} &= \frac{m_1 m_3 + m_2 m_4}{m_1^2 + m_2^2} \\ I_{Tq} &= \frac{m_2 m_3 - m_1 m_4}{m_1^2 + m_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \frac{1}{3} K_T [\cos(2\psi_T) - \cos(2\psi_a)] \\ m_2 &= \frac{1}{3} K_T [\sin(2\psi_T) - \sin(2\psi_a)] \\ m_3 &= \frac{S \cdot A_{VU}}{100 \sqrt{3} U_s} \cos(\arg(\dot{I}_{A_H} + \dot{I}_{A_L})) - \frac{a}{3} K_T I_{Lp} - \operatorname{Re}(\dot{I}_{A_H}) \\ m_4 &= \frac{S \cdot A_{VU}}{100 \sqrt{3} U_s} \sin(\arg(\dot{I}_{A_H} + \dot{I}_{A_L})) - \frac{b}{3} K_T I_{Lp} - \operatorname{Im}(\dot{I}_{A_H}) \\ a &= \cos(2\psi_a) + \sqrt{\cos^{-2}\varphi - 1} \sin(2\psi_a) \\ b &= \sin(2\psi_a) - \sqrt{\cos^{-2}\varphi - 1} \cos(2\psi_a) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

此时功率因数表达式为

$$\cos\varphi = \frac{U_a I_{ap} + U_T I_{Tp}}{\sqrt{(U_a I_{aq} + U_T I_{Tq})^2 + (U_a I_{ap} + U_T I_{Tp})^2}} \quad (9)$$

式中: U_a 、 U_β 、 U_T 分别为对应 α 、 β 和T端口的电压幅值。

PCC处负序的向量图如图4所示。

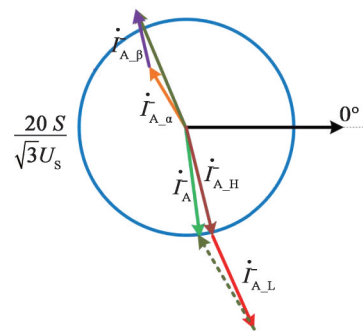


图4 PFC负序补偿电流向量图

Fig. 4 Vector diagram of current with PFC negative sequence compensation

3 分层控制策略

基于上述分析, 本文将电缆贯通供电系统及其补

偿装置视为一个整体, 针对其容性无功问题进行综合补偿, 以确保中心牵引变电所的不平衡度VU值、功率因数 $\cos\varphi$ 及电缆沿线电压 U_{STS} 均满足运行需求。

为实现综合补偿, 系统的工作流程如图5所示。首先, 优化计算层根据实测信息、补偿目标、约束条件, 及系统参数 K_T 、 K_α 、 K_β 、 L_i , 确定最优补偿容量。其次, 中心所依据负荷功率数据判别运行模式, 并由全局控制器计算出对应的阻抗匹配触发角 α 和补偿参考电流 I_{ap}^* 、 I_{aq}^* 、 $I_{\beta p}^*$ 、 $I_{\beta q}^*$ 。最后, PFC控制器和局部控制器依据计算结果生成PWM信号, 分别驱动PFC的变流器和阻抗匹配网络的晶闸管, 实现补偿。

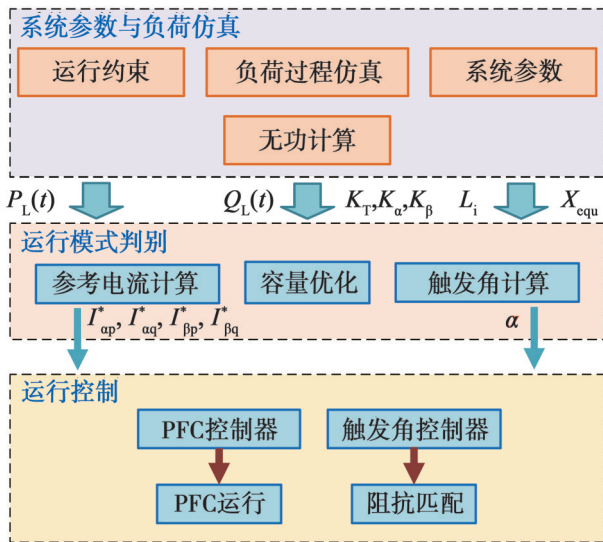


图5 分层分级补偿策略

Fig. 5 Hierarchical and graded compensation strategy

3.1 补偿容量确定与优化

为确保电缆沿线的电压满足要求, 本文基于单个贯通供电臂内电缆容性电流的总幅值, 选择75%作为无功补偿度^[16-17], 其表达式为

$$Q_{Lb} = U_N I_{Lb} = 0.75 U_N I_c \quad (10)$$

式中: Q_{Lb} 、 I_{Lb} 分别为补偿装置的总补偿功率和总补偿电流; U_N 为电缆线电压。

据此, 可计算得出每个补偿装置的补偿功率, 其表达式为

$$\begin{bmatrix} Q_{L1} \\ Q_{L2} \\ \vdots \\ Q_{Li} \end{bmatrix} = \frac{Q_{Lb}}{L} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: L 为牵引电缆所在供电区间的总长度; L_i 为第 i 个并联电抗器对应的补偿区段长度。

设定功率因数补偿目标为1, 在考虑机车牵引运行时产生的感性无功影响下, PFC装置的补偿功率 Q_s 表达式为

$$Q_s = \max \left(\sum_{i=1}^k 0.25 U_N I_{ci}, Q_{load} - \sum_{i=1}^k U_N I_{ci} \right) \quad (12)$$

式中: Q_{load} 为机车牵引运行时产生的最大无功功率; I_{ci} 为对应补偿区段长度的补偿电流。

根据PFC端口处的电压、电流表达式, 可推导出其补偿容量 S_{PFC} 表达式为

$$S_{PFC} = U_\alpha \sqrt{I_{ap}^2 + I_{aq}^2} + U_T \sqrt{I_{\beta p}^2 + I_{\beta q}^2} \quad (13)$$

将式(5)~式(9)代入式(13), 设定牵引负荷容量为80 MVA, 功率因数为0.97, 即可得到PFC的相对补偿容量关于短路容量 S 与电压不平衡度VU值的函数关系, 如图6所示。

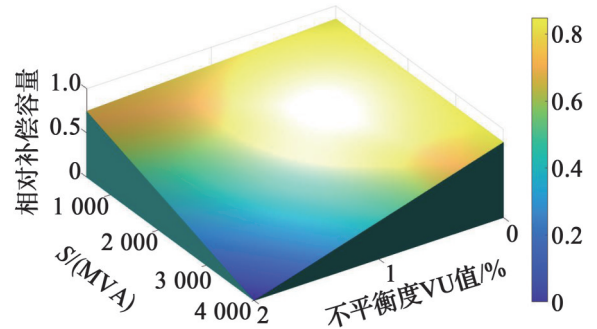


图6 相对补偿容量与VU值和短路容量 S 的关系

Fig. 6 Variation of relative compensation capacity with VU and short-circuit capacity (S)

由图6可知, 当短路容量在1000~4000 MVA内变化, 电压不平衡度VU值在0%~2%内变化时, 相对补偿容量和二者存在如下关系: 在补偿目标VU值固定的条件下, 短路容量越大, 所需补偿容量越小; 在短路容量一定的情况下, 补偿目标VU值取值越大, 所需补偿容量也越小。因此, 相较于VU值补偿至0%为目标的全补偿策略, 铁路领域通常采用满意补偿策略, 将VU值补偿目标设定为2%。该策略可在满足电能质量要求的前提下, 有效降低补偿容量, 从而节省补偿装置成本。

3.2 PFC控制策略

PFC控制原理如图7所示。首先, 通过锁相环快速检测并计算出负荷电流的有功和无功分量。随后, 基于式(5)和式(6), 结合系统参数、补偿目标及运行模式判别结果, 求解得到补偿电流的有功和无功参考分量, 进而合成最终的补偿电流参考值。最后, 将该参考值

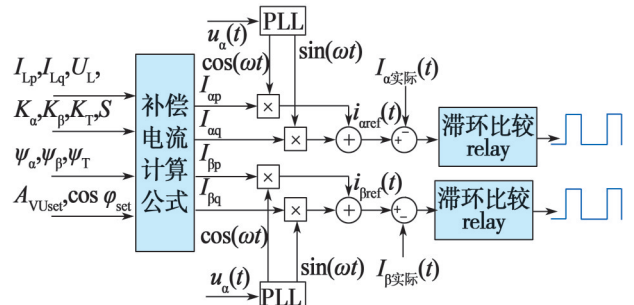


图7 指令电流与控制信号生成

Fig. 7 Command current and control signal generation

与实际补偿电流进行比较,通过电流跟踪环节生成相应的驱动信号。

3.3 阻抗匹配网络控制

阻抗匹配网络中 TCR 部分的等效阻抗^[18]可表示如下:

$$X_{\text{TCR}}(\alpha) = \frac{\pi X_{L_{\text{PF}}}}{2\alpha - \sin 2\alpha} \quad (14)$$

式中: $X_{L_{\text{PF}}}$ 为阻抗匹配网络感抗; α 为晶闸管导通角。

阻抗匹配网络的等效阻抗表达式为

$$X_{\text{equ}}(\alpha) = \frac{\pi X_{L_{\text{PF}}} X_{C_{\text{PF}}}}{X_{C_{\text{PF}}} (2\alpha - \sin 2\alpha) - \pi X_{L_{\text{PF}}}} \quad (15)$$

式中: $X_{C_{\text{PF}}}$ 为阻抗匹配网络的容抗。

基于式(15)可绘制等效阻抗随电感 L_{PF} 和电容 C_{PF} 及晶闸管触发角 α 变化的曲线,如图8所示。这表明等效阻抗值由 L_{PF} 、 C_{PF} 和角 α 决定,通过控制触发角 α 可连续调节阻抗性质,从而输出所需的容性或感性无功功率,完成系统功率的灵活匹配。

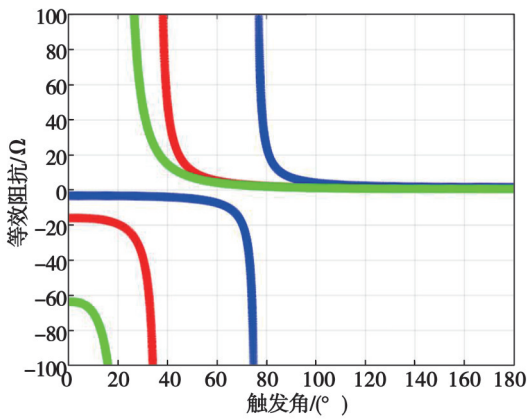


图8 等效阻抗变化

Fig. 8 Equivalent impedance variation

在单相牵引变电所应用场景下,阻抗匹配网络可进一步简化为参数可调的二阶LC网络模型,其传递函数可表示为

$$G(s) = \left[\frac{1}{sC_{\text{PF}}} // \frac{s\pi L_{\text{PF}}}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right] = \frac{(2\alpha - \sin 2\alpha) + s^2 \pi L_{\text{PF}} C_{\text{PF}}}{s\pi L_{\text{PF}}} \quad (16)$$

式中: s 为拉普拉斯算子。

4 案例分析

为验证本文提出的电缆贯通供电系统拓扑结构和控制策略的正确性与有效性,基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了系统仿真模型,并开展了补偿性能测试和对比分析。仿真所需的基础参数参考中国西部某在建铁路的工程参数进行设置,如表1所示;牵引负荷工况则依据系统潮流仿真中某一时刻的数据进行设置,如表2所示。在此基础上,进一步利用 Star Sim HIL 仿真平台进行半实物验证。

表1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

参数	数值	参数	数值
电网三相电压/kV	110	功率因数限值	0.9
电网频率/Hz	50	不平衡度约束/%	2%
短路容量/(MVA)	500	电缆电压上限/kV	116
PFC 输出电感/mH	2	电缆电压下限/kV	76
电感 L_{PF} /mH	5	牵引网电压上限/kV	29
并联电容 C_{PF} /μF	0.5	牵引网电压下限/kV	19

表2 牵引负荷设置

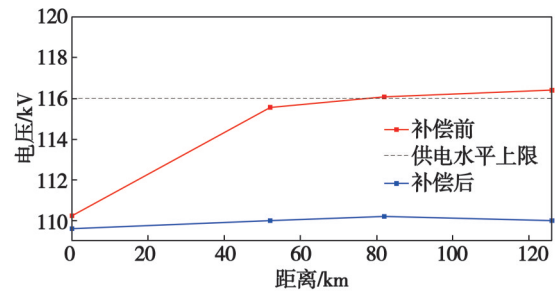
Table 2 Traction load settings

工况	位置/km	有功功率/MW	无功功率/Mvar
工况一	40	16	3
	70	13	3
	106	20	3
工况二	27	6	3
	45	16	3
	95	20	3
	126	10	3

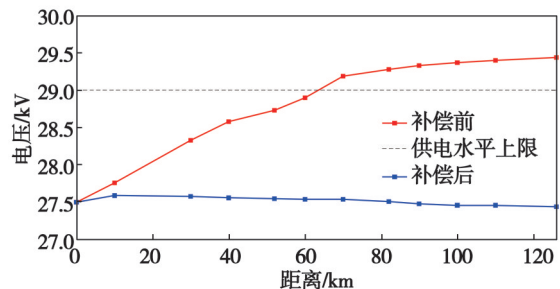
4.1 沿线电压调节

4.1.1 电压容升抑制

基于前文理论,针对线路空载运行工况进行仿真分析,得到的补偿前后电缆及牵引网沿线电压如图9所示。



(a) 电缆沿线电压



(b) 牵引网沿线电压

图9 空载时投切补偿前后节点电压

Fig. 9 Node voltages before and after no-load compensation switching

由图9可知,线路空载时,补偿前的电缆与牵引网沿线电压从60 km处超过相应限值,即电缆限值116 kV、牵引网限值29 kV,且越靠近供电末端电压抬

升越显著, 最高分别达到了 117 kV 和 29.1 kV, 符合前文所述的电缆贯通供电系统空载电压抬升特性。经过补偿后, 电缆沿线电压基本稳定在 110 kV 左右, 最大和最小值分别为 110.24 kV 和 109.60 kV, 牵引网沿线电压稳定在 27.50 kV 左右, 最大值、最小值分别为 27.51 kV、27.45 kV, 均满足沿线电压要求。

4.1.2 电压跌落抑制

为验证所提策略在线路牵引工况下仍能确保沿线电压不低于限值, 针对工况一和工况二开展仿真验证, 结果如图 10、图 11 所示。

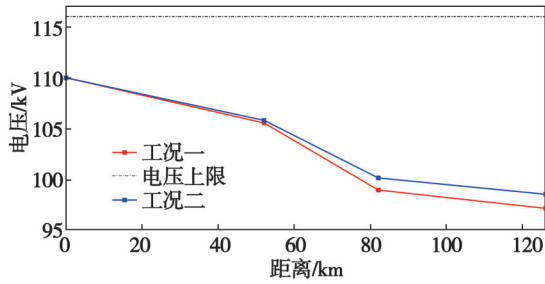


图 10 电缆沿线电压

Fig. 10 Voltage along the cable

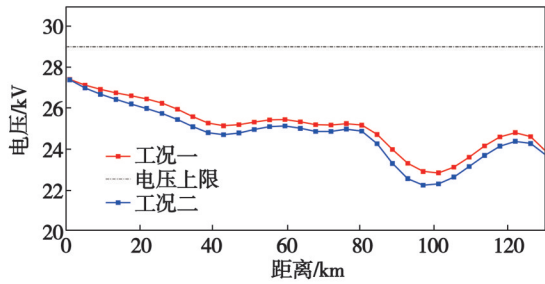


图 11 牵引网沿线电压

Fig. 11 Voltage along the traction network

在工况一与工况二下, 经补偿后, 电缆沿线电压基本维持在 97.16~109.7 kV, 牵引网沿线电压处于 22.66~27.41 kV 内。电压均呈现从中心所向供电末端逐渐下降的趋势, 符合前文所述电缆贯通供电系统带载电压下降特性。其中, 牵引网电压在机车取流处达到最小值, 这是由机车负荷电流产生的电压损失所致。可见, 采用本文策略补偿后, 电缆与牵引网沿线电压均满足标准规定的电压范围要求。

4.2 电能质量治理

根据表 2 数据, 设置仿真时间 0~0.2 s 对应工况一, 0.2~0.4 s 对应工况二, 得到补偿前 PCC 处功率因数 $\cos \varphi$ 与三相电压不平衡度 VU 值变化曲线, 如图 12 所示。

由图 12 可知, 未补偿时, 工况一条件下 A_{VU} 为 5.48%, $\cos \varphi$ 为 0.81, 均超出标准限值, 三相电压的振幅和相位偏离理想对称状态。0.2 s 切换至工况二后, A_{VU} 升至 7.75%, $\cos \varphi$ 为 0.97, 三相电压的幅值和相位偏离程度进一步加剧。

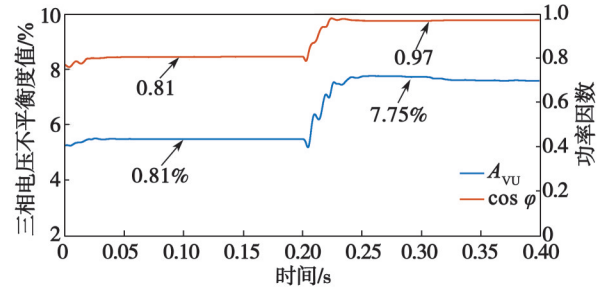


图 12 补偿前 PCC 处的 $\cos \varphi$ 和 A_{VU} 情况

Fig. 12 $\cos \varphi$ and A_{VU} conditions at PCC before compensation

经补偿后, PCC 处三相电压不平衡度 A_{VU} 与功率因数 $\cos \varphi$ 如图 13 所示。工况一下, A_{VU} 降至 2%, $\cos \varphi$ 为 0.9, 均满足标准限值要求; PCC 处三相电压的幅值和相位较补偿前更接近对称状态。切换至工况二后, A_{VU} 保持为 2%, $\cos \varphi$ 升至 0.97, 这主要由于机车提供了 3 MW 感性无功, 与电缆容性无功相抵消, 进一步提升了功率因数, A_{VU} 与 $\cos \varphi$ 仍满足限值要求。

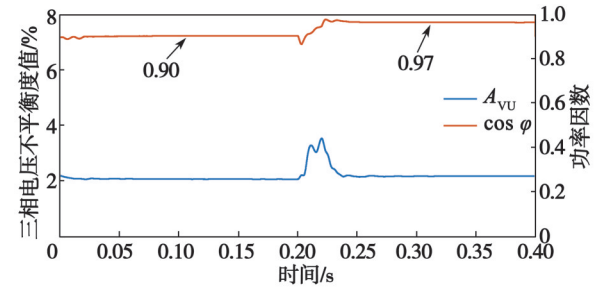


图 13 补偿后 PCC 处的 $\cos \varphi$ 和 A_{VU} 情况

Fig. 13 $\cos \varphi$ and A_{VU} conditions at PCC after compensation

4.3 既有方案对比

受电抗器固定补偿方式限制, 传统并联电抗器固定投切策略在线路工况剧烈变换时易出现过补偿问题。以工况一为例, 采用传统固定投切策略和本文所提策略对沿线电压进行无功补偿的对比结果如图 14 所示。

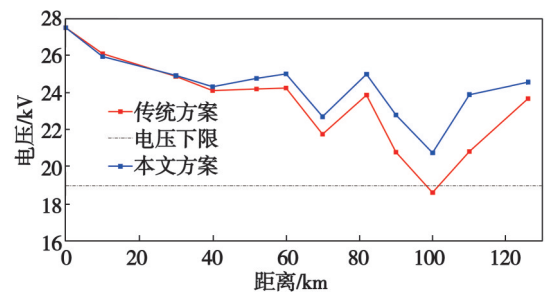


图 14 不同投切策略下的沿线电压

Fig. 14 Along-line voltage under different switching strategies

由图 14 可知, 运用固定投切策略时, 线路 98 km 和 100 km 处的牵引网电压跌落至 18.62 kV, 低于 19.00 kV, 导致机车运行性能下降。极端情况下, 电压甚至可能低于供电电压下限, 难以保障列车正常运行。

采用本文策略补偿后, 线路 98 km 和 100 km 处牵引网电压均保持在 20.77 kV 以上, 有效避免了因补偿导致的电压越下限问题。

4.4 试验验证

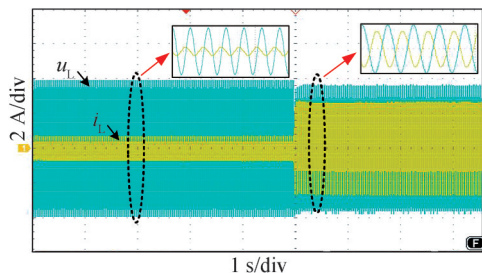
研究团队搭建了基于 HIL 的实时试验平台, 如图 15 所示。采用 Star Sim MT6060 模拟器对主电路进行仿真, 并利用 Star Sim 快速控制原型(RCP)MT1050 实现控制策略。



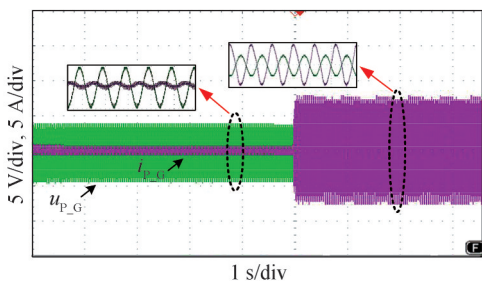
图 15 HIL 试验平台

Fig. 15 HIL experimental platform

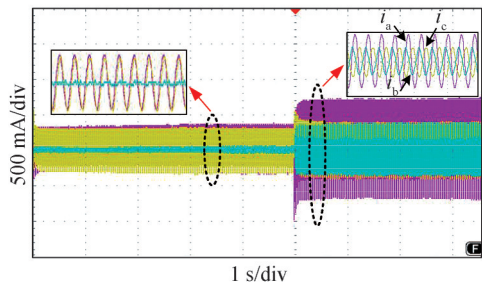
限于篇幅, 本文仅以空载工况和工况一为例, 验证系统的功能和稳定性。试验数据参考表 1, 半实物验证结果如图 16 所示。由图 16 可知, 负载电压电流变化过程中, 经本文方案补偿后的 PFC 输出电压和电流能实时跟随系统补偿需求, 系统运行稳定, PCC 处三相电流不平衡度及牵引网沿线电压均满足要求。



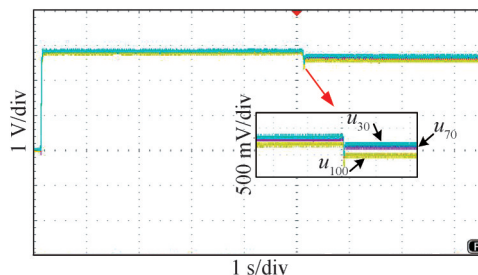
(a) 负载电流



(b) PFC 电网侧输出电压和电流



(c) PCC 处的三相电流



(d) 不同位置处牵引网电压

图 16 半实物验证结果

Fig. 16 HIL verification results

5 结论

本文针对薄弱电网对电能质量更为敏感的特点, 以及电缆贯通供电系统突出的空载电压抬升问题, 提出了基于阻抗匹配的电缆贯通供电系统模型和分层分级补偿策略, 主要结论如下:

①分析了电缆贯通牵引供电系统中负序的传播机理和 PFC 补偿原理; 采用满意补偿策略, 在优化补偿容量的同时实现 PFC 对系统负序的统一治理, 有效减小电缆贯通结构下的负序电流对电网侧的影响, 并降低了补偿成本。

②相较于采用并联电抗器的传统无功调节方案, 阻抗匹配网络能自适应匹配系统无功需求, 通过调节触发角输出连续可调的无功功率, 实现对沿线电压的灵活控制, 同时避免了过补偿问题。

③优化层根据系统状态信息, 实时计算补偿参考电流及阻抗匹配网络的触发角, 结合直接电流控制和晶闸管控制, 能快速响应系统变化并输出相应功率。仿真与半实物验证结果表明, 该策略响应速度快, 补偿效果良好。

④针对电缆贯通供电系统经济最优的协同补偿技术, 以及接入分布式能源后的协同控制技术, 仍有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] CHEN Y Y, CHEN M W, TIAN Z B, et al. VU limit pre-assessment for high-speed railway considering a grid connection scheme[J]. IET generation transmission & distribution, 2019, 13(7): 1121-1131.
- [2] ZHANG L Y, LIANG S W, LI X. Research on the harmonic in new continuous cable traction power supply system and its transmission characteristic[J]. IET generation transmission & distribution, 2020, 14(14): 2710-2718.
- [3] LI Q, WANG H, HUANG W, et al. Interconnected power supply system of traction substation group and its key technologies for the electrified railway[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(5): 1064-1074.
- [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(社会科学版), 2014(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 (social sciences), 2014(4): 559-568.
- [5] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K. A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway[C]//IEEE. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen: IEEE, 2004: 1869-1873.
- [6] MA F J, LUO A, XU X Y, et al. A simplified power conditioner based on half-bridge converter for high-speed railway system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2013, 60(2): 728-738.
- [7] HU S J, LI S, LI Y, et al. A comprehensive study for the power flow controller used in railway power systems[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(8): 6032-6043.
- [8] LUO A, WU C P, SHEN J, et al. Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/v transformers[J]. IEEE transactions on power electronics, 2011, 26(10): 2844-2856.
- [9] CHEN L, CHEN M W, CHEN Y T, et al. Modelling and control of a novel AT-fed co-phase traction power supply system for electrified railway[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 125: 106405.
- [10] ZHANG D H, ZHANG Z X, WANG W A, et al. Negative sequence current optimizing control based on railway static power conditioner in V/v traction power supply system[J]. IEEE transactions on power electronics, 2016, 31(1): 200-212.
- [11] CHEN M W, CHEN Y T, CHEN Y Y, et al. Unified power quality management for traction substation groups connected to weak power grids[J]. IEEE transactions on power delivery, 2022, 37(5): 4178-4189.
- [12] 陈迎涛. 高压牵引电缆同相贯通供电系统综合补偿方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- CHEN Yingtao. Research on a comprehensive compensation scheme for co-phase interconnected power supply system based on high-voltage traction cable[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [13] WANG L, PANG Y, LAO K W, et al. Design and analysis of adaptive impedance structure for cophase railway traction supply power quality conditioner[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(3): 1338-1354.
- [14] WANG L, PANG Y, TIAN W, et al. A new adaptive broadband thyristor-controlled impedance matching network[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(3): 2521-2532.
- [15] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- National technical committee for standardization of voltage, current levels and frequencies. Power quality-three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 郑一鸣, 徐华, 金佳敏, 等. 断路器特性对切除 35 kV 空母线并联电抗器操作过电压的抑制效果[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5282-5291.
- ZHENG Yiming, XU Hua, JIN Jiamin, et al. Suppression effects of circuit breaker characteristics on switching overvoltage of cutting shunt reactor on 35 kV no-load busbar[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2018, 33(22): 5282-5291.
- [17] 郭鑫鑫. 电气化铁路电缆牵引网研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- GUO Xinxin. Research on cable traction network for electrical railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [18] WANG L, LAM C S, WONG M C. Modeling and parameter design of thyristor-controlled LC-coupled hybrid active power filter (TCLC-HAPF) for unbalanced compensation[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(3): 1827-1840.

Research on a comprehensive compensation strategy for continuous cable traction power supply system based on adaptive impedance matching network

SUN Wei¹, MA Bin¹, FENG Jinwei², WANG Shuai²

(1. CHN ENERGY Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning, Hebei 062350, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: To mitigate excessive along-line voltage rise caused by capacitive reactive power of cables in conventional continuous cable power supply systems, this paper proposes a comprehensive compensation strategy that adaptively matches the cables' reactive power impedance. Firstly, a continuous cable power supply system model incorporating an impedance matching network was established. The model was used to analyze the propagation mechanism of negative sequence components across traction substations and the mechanism for suppressing voltage rise. Based on power decoupling, a port reference current expression for negative sequence compensation was derived. Next, a hierarchical control strategy was developed. At the optimization calculation layer, the capacity of the compensation device was optimized by satisfy compensation strategy while reducing cost; computes compensation current and the thyristor firing angle for the impedance matching network was also computed. At the control layer, current tracking was implemented on the power flow controller to enable rapid control and equivalent impedance of the network was regulated by adjusting thyristor's on/off durations to adaptively match the reactive power demand of the system, thereby achieving continuous reactive power compensation and along-line voltage regulation. Finally, both simulations and Star Sim hardware-in-loop (HIL) experiments verified the effectiveness and correctness of the proposed compensation strategy.

Keywords: continuous cable traction power supply system; adaptive; impedance matching; negative sequence compensation; reactive power compensation; Star Sim