



铁路串并联混合型牵引供电需求量 控制系统研究

仇乐兵^{1,2}, 田哲¹, 马伏军², 王平³

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 广州地铁建设管理有限公司, 广东 广州 510330)

摘要: 为降低电气化铁路最大需求、提升牵引供电系统能效, 文章提出一种适用于分相区的串并联混合型最大需求优化控制系统。该系统基于多组相互独立的交直交变流器与单相变压器构建, 具备显著降低有源装置容量配置需求、提高系统可靠性与经济性的优势。结合需求调节的实际应用场景及主要部件参数约束, 推导了系统关键参数的设计方法, 并提出装置级并网控制策略与系统级能量调度算法, 以实现牵引供电系统最大需求的快速精确控制。系统联调与仿真试验结果表明, 所提的最大需求控制系统能有效实现牵引供电系统需求优化目标。

关键词: 牵引供电; 最大需求; 并网控制; 能量调度; 仿真

中图分类号: U223.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0090-07

0 引言

我国电气化铁路普遍采用标称电压为 25 kV/50 Hz 的单相工频交流供电。作为重要的、为数不多的直接接入电网的大宗用户之一, 电气化铁路的电能消耗总量及需要电网提供的供电容量持续增长。如何实现电气化铁路高效节能, 提升线路运营效益, 已成为广泛关注的焦点^[1-5]。

针对铁路等大工业用户, 我国实行“两部制电价”制度, 其电价由与容量相关的基本电价和与用电量相关的电度电价相结合共同决定实际电价, 其电费构成主要包含基本电费和电度电费。用户可自主选择基本电费的计费方式: 按变压器安装容量或按实际用电功率的最大需求进行计量^[6]。对于负荷冲击性强、容量需求大的电气化铁路, 采用最大需求计费方式通常更具经济性。最大需求是指在一个电费结算周期(通常为一个月)内, 按指定时间窗口(我国现行标准为 15 分

钟或 30 分钟)测得的平均功率最大值, 该值由最大需求表或电能表内置的需求记录功能模块采集并存储, 将此最大值将作为该周期计算基本电费的依据。

为降低对电力系统三相不平衡的影响, 我国电气化铁路普遍采用分段轮换相序的单边供电方式, 该方式导致牵引供电网中存在电分相。电分相使牵引供电系统呈现“供电孤岛”特征^[7], 正常情况下各牵引变电所之间无法相互支援供电, 每个牵引所需独立承担其供电臂内的最大冲击性负荷。因此, 每个牵引所的最大需求相互独立, 且均由各所供电范围内的最大牵引负荷决定, 这种运行模式不利于牵引供电系统实现电费节支。

为提升牵引供电能力并优化最大需求, 可采用分区所直连方式构建双边供电模式; 然而, 该方式将导致牵引网与输电网的并联运行, 形成“电磁环网”, 从而引发不可控的均衡电流问题, 影响电力系统及牵引供电系统的安全经济运行水平。此外, 该方案也与我国现行的电力系统管理模式存在一定矛盾。另一种途径是基于全功率变流系统构建贯通式牵引供电制式,

通信作者: 仇乐兵, 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事柔性牵引供电技术研究; E-mail: choulb@csrzc.com

引用格式: 仇乐兵, 田哲, 马伏军, 等. 铁路串并联混合型牵引供电需求量控制系统研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 90-96. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.011.

Citation: QIU Lebing, TIAN Zhe, MA Fujun, et al. Research on the series-parallel hybrid demand control system for railway traction power supply[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 90-96. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.011.

该结构有助于降低最大需量, 但其系统复杂、成本较高、效率偏低, 目前尚处于理论研究与工程验证阶段。以德国为代表的部分欧洲国家采用自建独立单相低频电网专供电气化铁路, 实现了全线贯通和需量控制, 然而, 该系统的供电模式不适合我国的基本国情, 缺乏经济可行性。

针对由株洲中车时代电气股份有限公司研发的一种基于有源容量最小化的串并联混合型铁路牵引供电最大需量控制系统, 本文将研究其主电路关键参数的设计方法, 并设计相应的柔性并网控制策略与能量调度算法, 最后通过系统联调与仿真试验验证所提系统及控制策略可有效均衡相邻牵引变电所之间的负荷, 显著降低最大需量, 为电气化铁路实现高效、经济的需量控制提供一种可行的技术途径。

1 系统结构及基本原理

最大需量控制系统的结构示意图如图1所示, SS1与SS2表示同相牵引变电所。由图1可知, 单相变压器T1高压侧并联接入供电臂A, 其低压侧经交直交变流器连接至变压器的T2的低压侧; T2高压侧绕组则串联接入供电臂B和供电臂A之间, 即其一端连接供电臂A, 另一端连接供电臂B。由于分区所两端供电臂为同相电源供电, 电压差较小, 该最大需量优化控制系统仅需配置小容量变流装置, 即可实现两供电臂间的大容量可控功率融通, 有利于降低系统整体成本与占地面积。为进一步提高系统可靠性与可用性, 交直交变流器采用多支路并联冗余结构运行, 并选用多分裂变压器作为单相变压器接线形式。

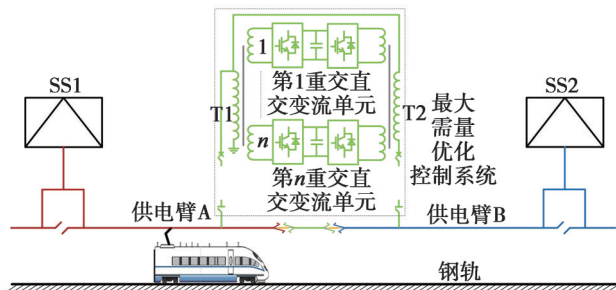


图1 最大需量控制系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the maximum demand control system structure

交直交变流器能够在两个交流端口之间实现有功功率的双向流动。该变流器与串联变压器T2协同工作, 向两个供电臂注入一个幅值与相位均可连续调节的补偿电压, 从而灵活控制供电臂间的功率交换, 为牵引供电系统的需量优化提供有效支撑。

2 参数设计

最大需量优化控制系统通过单相变压器与多组交

直交变流器的协同配合, 实现不同供电臂之间的功率调度。本章重点对该系统的容量与额定电压、变流器及变压器等核心部件的关键参数展开分析与研究。

2.1 系统容量及电压选择

由图1可知, 变压器T2高压侧电压等于供电臂A与供电臂B之间的电压差。结合现场实测数据、列车电压-功率曲线、列车运行图以及供电臂等效网络, 通过车网耦合仿真可得出分相区两供电臂间电压相位差 θ 与电压幅值差 m_d 的变化范围。

设供电臂A的电压有效值为 $\bar{U}_a$, 供电臂B的电压有效值为 $\bar{U}_b$, 两者之间的电压相位差为 θ , 需量控制系统调度功率为 S_p , 变压器T2高压侧电流有效值为 $\bar{I}_n$, 其电压有效值为 $\bar{U}_x$, 计算如下:

$$\bar{U}_x = \sqrt{\bar{U}_a^2 + \bar{U}_b^2 - 2 \times \bar{U}_a \times \bar{U}_b \times \cos \theta} \quad (1)$$

由式(1)和变压器T2高压侧电流 $\bar{I}_n$ 可计算出变压器T2的视在功率 S_{T2} 及变流器的视在功率 S_{con} , 即

$$S_{T2} = S_{con} = \bar{U}_x \times \bar{I}_n \quad (2)$$

分相区两端供电臂电压通常为同相别, 其电压相位差较小(一般会小于 10°), 尤其在牵引变电所采用同相供电技术后, 无论线路是处于正常运行工况还是处于越区供电工况, 分相区两端供电臂电压均能保持相别一致。某工程现场实测的两个牵引变电所间的电分相区两端供电臂电压及其电压差如图2所示。

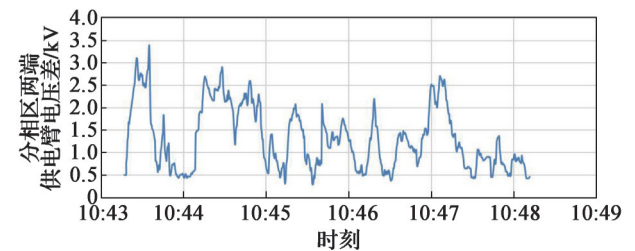
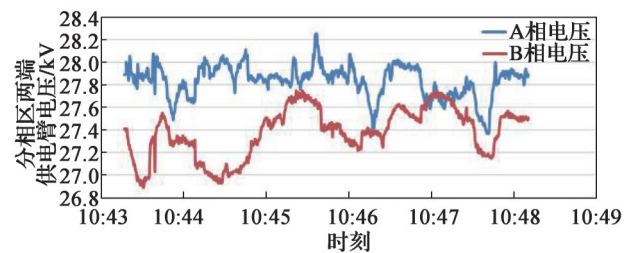


图2 分相区两端供电臂电压实测值

Fig. 2 Measured voltage values of supply arm at both ends of phase-separating section

由图2可知, 分相区两端电压差远小于供电臂对地电压 $\bar{U}_a$ 和 $\bar{U}_b$, 因此, 变压器T2高压侧电压 $\bar{U}_x$ 也显著低于供电臂对地电压 $\bar{U}_a$ 和 $\bar{U}_b$, 这一特性使得最大需量控制系统中串联侧变压器T2可采用较低的高压侧工作电压等级, 从而有效降低变压器T2及与其相连的变流器容量配置需求。

式(1)和式(2)是确定系统容量及电压等级的主要依

据,并需要综合考虑牵引网电压的波动范围。为进一步提升系统可靠性与经济性,需要在评估系统冗余设计要求和间歇性运行工况的基础上,最终确定系统的容量配置方案。

2.2 变流器关键参数

变流器拓扑可采用单相两电平或三电平交-直-交结构。设变流器直流侧电压为 U_{dc} , IGBT 关断电压 U_{cesp} 可由下式确定:

$$U_{cesp} = (1.35U_{dc} + 200)\beta_v \quad (3)$$

式中: β_v 为安全系数,通常取值不小于 1.15。

变流器交流侧额定电压的选取需综合考虑直流侧额定电压及其波动范围、脉冲宽度调制方式、交流侧等效连接阻抗及所产生的压降等因素。在采用常规单极性倍频正弦脉冲宽度调制时,假设直流侧额定电压为 1 800 V,交流侧最大理论输出电压可达 1 273 V。对于单相交直交变流器,还需要重点考虑直流侧二次脉动对输出电压的影响,一般建议将交流侧额定电压 U_{nm} 取值不宜超过 1 000 V,以保证系统稳定运行。

需量控制系统中,变流器容量为 S_{con} 。为提升系统可靠性,该变流器通常由多个交直交变流单元在交流侧并联构成;并联方式可采用直接并联或通过分裂变压器实现等效并联。设变流单元数量为 N ,各单元均流系数为 η_i (建议取值 0.95),则每个变流单元容量为 $S_m = S_{con}/(N\eta_i)$ 。据此可计算得到单个变流单元交流侧额定电流 $I_{nm} = S_m/U_{nm}$ 。此外,为保障 IGBT 器件安全运行,通常取 1.5~2.0 倍的电流裕量,因此所选 IGBT 的最大可重复关断电流 I_{cm} 范围为

$$1.5 \times \sqrt{2} I_{nm} < I_{cm} < 2 \times \sqrt{2} I_{nm} \quad (4)$$

由式(4)即可确定开关器件的电流等级需求。

为保障变流器稳定运行并提供有效的功率缓冲,需要在其直流侧配置合适的支撑电容。该电容的关键参数包括额定电压 U_{cdc} 、额定电流 I_{cdc} 、电容容值 C_{dc} 等。其中,额定电压 U_{cdc} 应高于变流器直流侧的工作电压,一般取为其最大电压值。电容值的精确计算需综合考虑变流器无功出力、直流侧电压二次脉动、交流侧电压相位差与幅值差等因素,其初步设计电容值可参考下式得出^[8]:

$$C_{dc} \geq \frac{10 \times S_m}{K \times \omega \times U_{cdc}^2} \quad (5)$$

式中: ω 为电网工作频率; K 为交流侧电压相数。

根据式(5)计算出电容值后,结合车网系统协同仿真,并考虑不同运行工况及可选的电容器单体产品规格,对该电容值进行进一步验证与优化调整。

确定电容器的容值后,还需确定电容器的额定电流 I_{cdc} 。单相交直交变流器直流侧支撑电容器的工作电流主要包含二倍工频脉动电流和高频谐波电流。通常

可先通过公式估算其电流近似值,再结合仿真详细评估支撑电容的实际工作电流范围,为电容单体选型提供依据^[9]。

2.3 变压器关键参数

并联变压器 T1 直接接入牵引网供电臂与回流轨(或大地)之间,其高压侧额定电压一般可选为 27.5 kV。在变压器设计中,需对铁芯磁通密度进行优化选择,不恰当的磁通密度选择可能导致变压器损耗与噪声显著增大,进而影响其安全稳定运行。为降低最大需量下控制系统的总体占地与成本,可通过变压器短路阻抗对应的等值电感实现变流器与变压器间缓冲电感的集成设计。因此,变压器 T1 的短路阻抗需要结合电流脉动特性及变流器的四象限运行工况进行综合评估选择^[10]。该等值电感的最大值可依据式(6)进行计算。

$$L_r \leq \frac{0.3U_{nm}^2}{\omega I_{nm}} \quad (6)$$

式中: L_r 为变压器短路阻抗对应的等值电感; U_{nm} 为变流器交流侧额定电压; ω 为电网工作频率。

为抑制变流器交流侧谐波电流并确保系统稳定运行,变压器等值电感需满足一定下限要求,其最小值可依据式(7)计算确定。

$$L_r \geq \frac{(U_{cdc} + \sqrt{2}U_{nm})U_{nm}}{0.4\sqrt{2}P_0f_s} \quad (7)$$

式中: P_0 为变流器交流侧额定功率; f_s 为开关频率。

由式(6)与式(7)可确定等值电感 L_r 的选择范围,若两式计算结果未能明确限定电感的取值边界,则应结合工程实际情况进行调整后再重新计算。对于串联侧变压器 T2,其短路阻抗的设计需要重点考虑电流脉动与电压降落等因素,并可同样依据式(6)与式(7)进行计算。在确定变压器容量时,除满足最大需量控制系统的功率需求外,还应考虑变流器谐波电流的影响,其许用容量可参照国家标准 GB 1094.16—2013 所规定的方法进行计算。

3 能量调度算法

为实现相邻牵引变电所之间的功率均衡,变电所间能量调度算法的基本控制原则如下:

① 如变电所 SS1 的高压进线总功率 $P_A < 0$,且变电所 SS2 的进线总功率 $P_B > 0$,则需量控制系统将有功功率从 SS1 转移至 SS2,转移功率为两臂总有功功率差值的一半。

② 如变电所 SS1 的高压进线总功率 $P_A > 0$,且变电所 SS2 进线总功率 $P_B < 0$,则需量控制系统将有功功率由 SS2 转移至 SS1,转移功率同样为两臂总有功功率差值的一半。

③ 当变电所 SS1 进线总功率 $P_A > 0$, 变电所 SS2 进线总功率 $P_B > 0$, 则需量控制系统将功率从有功功率较大的变电所转移至有功功率较小的变电所, 转移功率为两臂有功功率差值的一半。

④ 当变电所 SS1 进线总功率 $P_A < 0$, 变电所 SS2 进线总功率 $P_B < 0$ 时, 则需量控制系统将不转移功率, 且该工况在实际运行中很少出现。实际工程应用中, 为避免最大需量控制系统引发牵引变电所高压进线侧的异常功率振荡, 并降低系统并网运行期间的功率损耗, 需要依据牵引变电所高压进线总功率 P_A 和 P_B 的实时状态, 合理设定系统的启动运行阈值与待机阈值^[11-12]。

4 并网控制策略

4.1 并联侧控制

需量控制系统并联侧变流器通过四象限控制确保中间直流侧电压稳定^[13-15]。为提升变流器的动态响应性能及其在电网异常工况下的适应性, 所采用的四象限控制策略基于改进型锁相环与瞬态电流控制方法相结合。

改进型锁相环结构如图3所示^[16]。

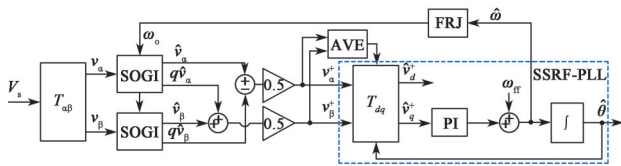


图3 改进的锁相环结构

Fig. 3 Structure of improved PLL

利用二阶广义积分器 (second order generalized integrator, SOGI) 可实现输入电压信号中正、负序分量的精确分离, 同时有效抑制谐波干扰。单相变流器交流回路的电压矢量方程为

$$\dot{V}_s = \dot{V}_{ref} + \dot{I}_s R_n + j\omega L_n \dot{I}_s \quad (8)$$

式中: $\dot{V}_s$ 为交流侧电压矢量; $\dot{V}_{ref}$ 为调制电压基波矢量; $\dot{I}_s$ 为交流侧电流矢量; L_n 为等效连接电感; R_n 为等效电阻。

基于式(8), 四象限变流器的瞬态电流控制算法可表示为:

$$\left. \begin{aligned} I_{n1} &= K_p (U_{dg} - U_d) + (1/T_i) \int (U_{dg} - U_d) dt \\ I_{n2} &= I_d U_d / V_s \\ I_n &= I_{n1} + I_{n2} \\ v_{ref}(t) &= v_s(t) - (I_n R_n \sin \omega t + I_n \omega L_n \cos \omega t) - \\ &\quad P [I_n \sin \omega t - i_s(t)] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: I_{n1} 、 I_{n2} 为电流中间变量; I_n 为 I_{n1} 、 I_{n2} 之和; K_p 、 T_i 为 PI 调节器参数; I_d 为中间回路直流电流; U_d 为中间回路直流电压; U_{dg} 为中间直流侧电压参考值; $v_s(t)$ 为网侧电压瞬时值; P 为比例系数; $i_s(t)$ 为网侧电流瞬时值。

根据式(9), 可构建相应的瞬态电流控制结构, 其系统框图如图4所示。

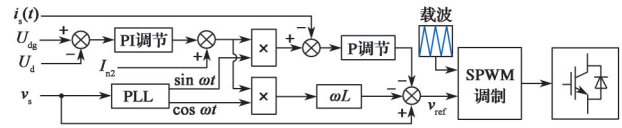


图4 并联侧瞬态电流控制策略

Fig. 4 Transient current control strategy for parallel side

4.2 串联侧控制

串联侧控制的主要目标为实现两供电臂之间的功率融通。该控制过程首先通过能量调度算法生成功率调度参考值, 进而推导出串联侧的目标电流参考值。为实现对目标电流的精确跟踪, 采用基于虚拟 dq 解耦的电流双闭环控制策略, 设定参考电流为 i_{dref} 、 i_{qref} , 其控制结构如图5所示。

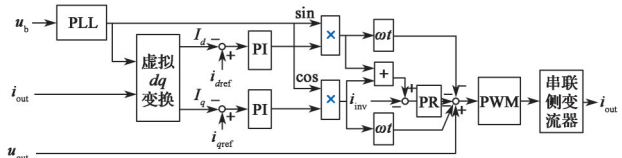


图5 串联侧电流控制策略

Fig. 5 Current control strategy for series side

为了简化控制复杂度, 以供电臂 B 作为控制基准相位, 对供电臂 B 电压 u_b 进行锁相。基于锁相信息对目标电流进行虚拟 dq 变换, 分解为 d 轴和 q 轴分量, 并分别与对应的参考值进行比较, 经 PI 调节器生成控制量。随后, 结合相位正弦与余弦信号合成变流器输出电流的参考值, 再通过比例谐振控制器 (PR) 与变流器交流侧输出电流信号 i_{inv} 进行闭环调节。在此基础上引入电压前馈控制, 生成调制波并与与载波进行比较, 产生 PWM 脉冲驱动, 从而实现串联侧变流器电流的实时精准控制^[17], 有效支撑系统级能量调度策略的实施。

5 联调仿真及试验研究

5.1 车-网联调仿真

采用 Simulink 仿真工具, 基于多导体传输线理论构建了带回流线的直接供电方式下的牵引网链式模型, 并结合列车牵引计算结果, 对本文所提出的需量控制系统进行了联调仿真分析。设置牵引变电所 SS1 出口电压为 29 kV, SS2 出口电压为 25 kV; 接触线与承力索单位等效自阻抗为 $0.06575 + j0.5054$, 回流线单位自阻抗为 $0.09165 + j0.7671$, 钢轨单位等效自阻抗为 $0.1253 + j0.4689$; 列车负载模型选用 HXD1C 型机车。仿真结果如图6~图9所示。

图6展示了需量控制系统中变流器的直流侧电压波

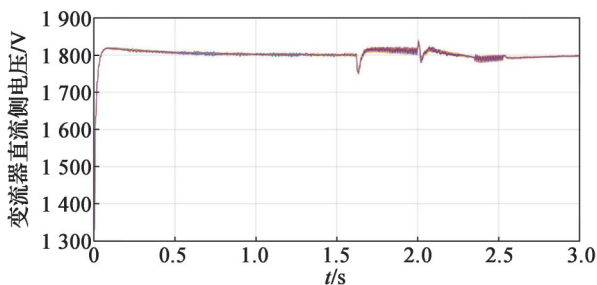


图6 需量控制变流器中间直流侧电压

Fig. 6 DC-link voltage of demand control converters

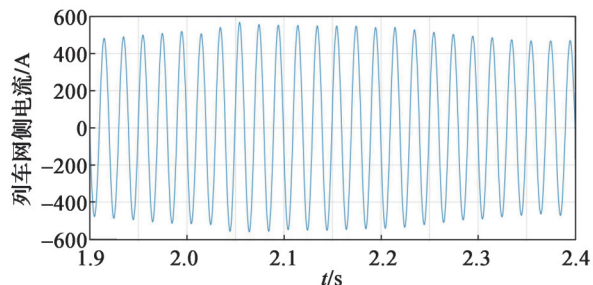


图7 机车网侧电流

Fig. 7 Grid side current of HXD1C

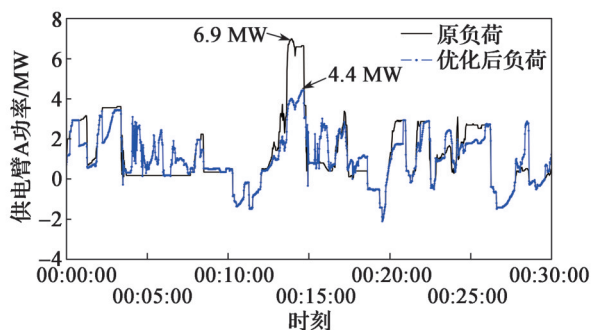


图8 需量优化前后供电臂A负荷

Fig. 8 Loads of supply arm A before and after demand optimization

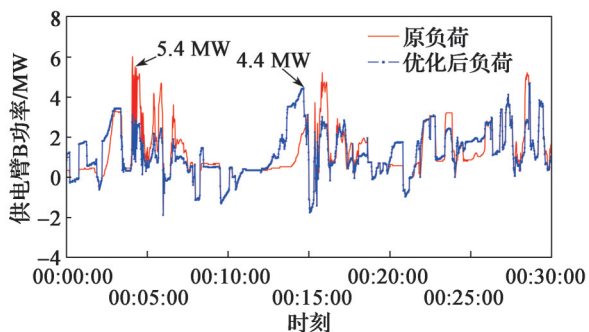


图9 需量优化前后供电臂B负荷

Fig. 9 Loads of supply arm B before and after demand optimization

形。图7为列车高压网侧电流波形。图8、图9分别为需量控制系统优化前后供电臂A、B的负荷，由图8可知供电臂A的最大负荷由优化前的6.9 MVA降至4.4 MVA；由图9可知供电臂B的最大负荷由优化前的5.4 MVA降至4.4 MVA，实现了牵引负荷的“削峰填谷”，有效提高了供电臂间的负荷均衡程度，并降低了系统整体最大需量。

5.2 实测数据仿真评估

基于国内某单线铁路的两个牵引变电所高压进线侧实测数据，结合车网联调仿真模型，对需量控制系统的应用效果进行了仿真与评估。需量优化控制下的牵引变电所高压进线侧需量计算结果如图10、图11所示。

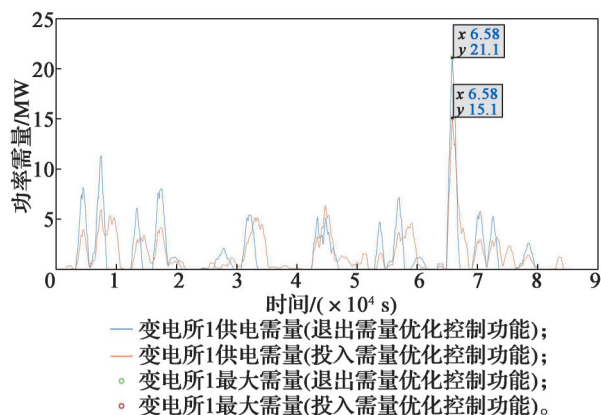


图10 需量优化控制前后的变电所1功率需量

Fig. 10 Substation 1 power demand before and after demand optimization control

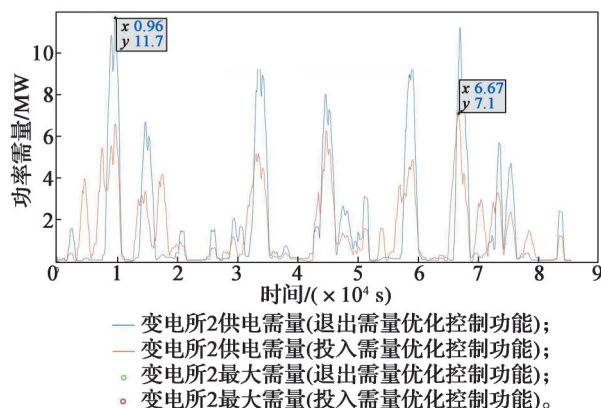


图11 需量优化控制前后的变电所2功率需量

Fig. 11 Substation 2 power demand before and after demand optimization control

从图10牵引变电所1的需量统计数据可以看出，在投入需量优化控制功能后，牵引变电所最大需量由优化前的21.1 MW下降为15.1 MW，降幅达6 MW；图11牵引变电所2的需量统计数据表明，最大需量由优化前的11.7 MW降低至7.1 MW，减少4.6 MW。结果表明，需量优化控制系统有效降低了牵引变电所的最大需量，两个所共计减小最大需量达10.6 MW，近似估算每月节省基本电费可达31.8万元（按30元/kW计算），提升了系统运行的经济水平。

6 结论

本文从系统拓扑、参数设计、装置级控制策略与系统级能量调度算法、车网协同仿真及实测数据验证

等多个方面, 对电气化铁路牵引供电最大需量优化控制系统开展了研究, 主要结论如下:

①基于串并联混合拓扑构建的最大需量优化控制系统可显著降低关键部件的容量配置需求, 以相对较小容量的变流装置实现大功率牵引能量的灵活调度, 在保证系统可靠性的同时有效控制了投资成本。

②结合工程实际应用场景, 本文所提的主要参数设计方法及部件选型原则, 可为最大需量控制系统的关键参数设计提供理论依据与工程指导, 支撑系统实现优化配置。

③通过改进型瞬态电流控制与比例谐振控制相结合的策略, 并配合系统级能量调度算法, 可实现变电所间功率交互的快速、精确与连续控制, 从而有效均衡各变电所最大需量。

④通过变流系统控制实现供电臂之间的功率交换, 对电力系统而言, 本质上可视为以电力电子变流器实现高压电源间的柔性互联, 其技术原理与目前广泛采用的 HVDC/UPFC 等大电网潮流控制装置相似, 更易被现有电力系统接纳, 同时消除了传统双边供电制式下不可控能量交换所带来的安全隐患。

参考文献:

- [1] 杨凡. 电气化铁路最大需量计费方法分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YANG Fan. Analysis of charging method for maximum demand of electrified railway[D].
- [2] 邢文, 段斌. 基于负荷转移调度的高耗能企业电能需量控制[J]. 电气技术, 2016(9): 70-76.
XING Wen, DUAN Bin. Power demanding control for energy-intensive enterprises based on load transfer dispatch[J]. Electrical engineering, 2016(9): 70-76.
- [3] CHEN Junyu, YUE Zhao, WANG Minghao, et al. Power sharing and storage-based regenerative braking energy utilization for sectioning post in electrified railways[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2024, 10(2): 2677-2688.
- [4] KANO N, TIAN Zhongbei, CHINOMI N, et al. Renewable sources and energy storage optimization to minimize the global costs of railways[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2025, 74(5): 7049-7060.
- [5] WU Liran, WU Mingli. Utilization of regenerative braking energy in adjacent power sections of railway systems[J]. IET electric power applications, 2024, 18(2): 174-184.
- [6] 吕顺凯. 交流电气化支线铁路最大需量控制技术[J]. 中国铁路, 2022(1): 57-63.
LYU Shunkai. Maximum demand control technology for AC electrified branch railway lines[J]. Chinese railways, 2022(1): 57-63.
- [7] HAYASHIYA H, KONDO K. Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways[J]. IEEE transactions on electronic engineering, 2020, 15(5): 632-645.
- [8] 饶沛南. 大功率交流传动机车牵引变流器的研究与开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
RAO Peinan. Research on high-power AC drive locomotive traction converter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [9] 陈燕平. 牵引变流器用电力电容器设计理论及应用技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
CHEN Yanping. Research on electrical capacitor theory and application for traction converter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [10] 张敏, 仇乐兵. 交流牵引网中性区柔性供电系统研究[J]. 电气化铁道, 2019, 30(4): 25-29.
ZHANG Min, QIU Lebing. Research on flexible power supply system in neutral zone of AC traction network[J]. Electric railway, 2019, 30(4): 25-29.
- [11] 吕顺凯. 基于变电所间能量调度的电气化铁路再生制动能量利用系统[J]. 机车电传动, 2022(1): 127-133.
LYU Shunkai. Regenerative braking energy utilization system for electrified railways based on energy scheduling between substations[J]. Electric drive for locomotives, 2022(1): 127-133.
- [12] LU Qiwei, HE Bangbang, GAO Zhixuan, et al. An optimized regulation scheme of improving the effective utilization of the regenerative braking energy of the whole railway line[J]. Energies, 2019, 12(21): 4166.
- [13] 胡海涛, 陈俊宇, 葛银波, 等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 246-256.
HU Haitao, CHEN Junyu, GE Yinbo, et al. Research on regenerative braking energy storage and utilization technology for high-speed railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 246-256.
- [14] 魏文婧, 胡海涛, 王科, 等. 基于铁路功率调节器的高速铁路牵引供电系统储能方案及控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1290-1299.
WEI Wenjing, HU Haitao, WANG Ke, et al. Energy storage scheme and control strategies of high-speed railway based on railway power conditioner[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(6): 1290-1299.
- [15] ROUDSARI H M, JALILIAN A, JAMALI S. Flexible fractional compensating mode for railway static power conditioner in a V/v traction power supply system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(10): 7963-7974.
- [16] 仇乐兵, 唐建宇, 曹洋, 等. 基于二阶广义积分器的改进型电网锁相环[J]. 大功率变流技术, 2017(2): 51-57.
QIU Lebing, TANG Jianyu, CAO Yang, et al. An improved phase-locked loop based on second-order generalized integrator[J]. High power converter technology, 2017(2): 51-57.
- [17] FU Gang, QIU Lebing, HU Jingyu. Research on flexible

ground automatic neutral-section passing technology base Power and Propulsion Conference. Hanoi: IEEE, 2019: 1-7.
on voltage compensation[C]//IEEE. 2019 IEEE Vehicle

Research on the series-parallel hybrid demand control system
for railway traction power supply

QIU Lebing^{1,2}, TIAN Zhe¹, MA Fujun², WANG Ping³

- (1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;
3. Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510330, China)

Abstract: To reduce the maximum demand of electrified railways and improve the energy efficiency of power supply, this paper proposes a series-parallel hybrid maximum demand control system used in phase-separating section. This system was constructed based on multiple independent AC-DC-AC converters and single-phase transformers. It significantly reduces the capacity configuration requirements for the active devices and improves the overall reliability and cost-effectiveness of the system. Based on application scenarios for demand regulation and the parameter constraints of the main components, a key parameter design method was derived for the demand control system. Additionally, a device-level grid-connected control strategy and a system-level energy dispatching algorithm were developed to achieve fast and precise control of the maximum demand in traction power supply systems. Results from joint commissioning and simulation experiments show that the maximum demand control system can effectively optimize demand control in traction power supply systems.

Keywords: traction power supply; maximum demand; grid-connected control; energy dispatching; simulation