

Research on Voltage Stabilization Scheme of Traction Network under Regenerative Braking Condition Based on MMC_STATCOM

Hangzhou Lei¹ Yexin Zhang²

1.Chengdu Jiaoda XJ Electric Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611731, China

2.School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 611756, China

Abstract

Under braking condition, the regeneration braking energy will be sent back to the traction network and may threaten the voltage safety. The paper tried to suppress the voltage lift using Modular Multilevel Converter STATCOM (MMC_STATCOM). Based on the principle of MMC_STATCOM, the capacitance parameters of the sub-module, the inductance parameters of the bridge arm, and the parameters of the LC filter circuit are calculated. The capacitor voltage control strategy and the dq-cross decoupling control strategy are studied, and the simulation model is established. Finally, based on the electrical relationship between MMC_STATCOM and vehicle-grid system, the compensation device is put into the vehicle-grid integrated model. The results show that the compensation scheme has good voltage stabilization effect.

Keywords

high-speed railway; regeneration braking; MMC_STATCOM; catenary voltage

基于 MMC_STATCOM 的动车组再生制动工况下牵引网稳压方案研究

雷杭州¹ 章叶心²

1. 成都交大许继电气有限责任公司, 中国·四川成都 611731

2. 西南交通大学电气工程学院, 中国·四川成都 611756

摘要

再生制动工况下, 返送至电网的能量可能会引发牵引网电压抬升问题。论文尝试利用Modular Multilevel Converter STATCOM (MMC_STATCOM) 对车-网系统电压抬升进行抑制; 基于MMC_STATCOM拓扑结构和工作原理, 对子模块电容参数、桥臂电感参数以及LC滤波电路参数进行计算, 对子模块电容电压控制策略、dq坐标系下有功无功交叉解耦控制策略进行研究, 并建立MMC_STATCOM仿真模型。最后, 基于MMC_STATCOM与车-网系统的电气连接关系, 将其投入车-网模型联合仿真, 分析结果表明, 该抑制方案稳压效果较好。

关键词

电气化铁路; 再生制动; MMC_STATCOM; 牵引网电压

1 引言

再生制动是指高速动车组在减速运行过程中, 牵引电动机转为发电机, 并将多余的电能反馈回牵引网的过程^[1]。在此过程中, 再生制动能量通过逆变器、中间直流环节、整流器及车载变压器直接返送至牵引供电系统, 这可能会引起牵引网电压的抬升^[2]。其中, 牵引网的供电电压水平与动车组的安全运行息息相关。例如, 2014年1月起, 在中国西安局

北环线某牵引所供电臂范围内, 由于牵引网电压超出供电安全水平, 引发机车自动降低功率, 造成机车牵引失流停车达14次, 极大影响了铁路的生产运输秩序^[3]。因此, 有必要对动车组再生制动工况下的牵引稳压方案进行研究。

目前, 中国和其他国家针对再生制动能量造成牵引网电压抬升这一现象, 通常采用优化牵引供电系统或加设补偿装置进行治理。采用同相牵引供电的方式对再生制动造成的网压抬升进行抑制, 但抑制效果受系统容量及牵引变压器容量的限制^[4]。分别采用双边供电的方式和加设再生能量释放装置的方式, 分析结果表明采用双边供电方式在一定程度上能

【作者简介】雷杭州(1973-), 男, 中国湖北孝感人, 本科, 高级工程师, 从事电气化铁路继电保护装置研发。

降低动车组所在供电臂的牵引网电压，但抑制效果较为有限；加设再生能量释放装置较双边供电方式抑制效果更好^[5]。法国 Evron 牵引变电站安装的 STATCOM 设备，可综合改善牵引供电系统的电能质量，且存在动态响应迅速、占地面积小、安全性高等优势，但仍依赖于大容量的工频变压器，安装地点受限且投入成本较高^[6]。

针对现有研究的不足，结合基于模块化多电平变换器（Modular Multilevel Converter, MMC）的 STATCOM 装置^[7]具有拓扑结构简洁、电平数可调、可综合治理电能质量等优点，论文尝试采用基于 MMC_STATCOM 的稳压方案对动车组再生制动能量导致的牵引网压抬升进行抑制。

2 MMC_STATCOM 装置并联补偿拓扑结构

MMC_STATCOM 装置并联补偿拓扑结构如图 1 所示。图中， u_s 为网侧电压， i_s 为网侧电流， L_s 为网侧电感， R_s 为网侧电阻。MMC_STATCOM 中各相的上、下桥臂结构一致，均由 n 个串联子模块与桥臂电感 L_0 组成。其中，每个串联子模块均包含 2 个 IGBT 和直流电容。对于单相半桥臂， n 个串联子模块可输出 $0、U_c、2U_c、\dots、nU_c$ 的电压（即 $n+1$ 个电平），为保证系统可获得最大直流电压率及稳定的直流电压，MMC_STATCOM 中各相的上、下桥臂的串联子模块需遵循对称互补投入的原则。

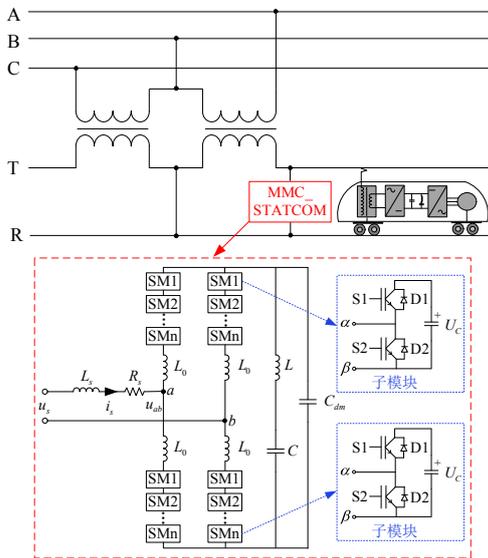


图 1 MMC_STATCOM 并联补偿拓扑结构

3 MMC_STATCOM 主电路参数计算

3.1 子模块数目

根据 MMC_STATCOM 工作原理可知，子模块数 n 与直流侧电压 U_{dc} 满足：

$$n = \frac{U_{dc}}{U_c} \quad (1)$$

式中， U_c 为子模块电容平均电压。

定义 MMC_STATCOM 的电压调制比 m 为：

$$m = \frac{2\sqrt{2}U_s}{U_{dc}}, (0 < m < 2) \quad (2)$$

联合式（1）、式（2）可得：

$$n = \frac{2\sqrt{2}U_s}{mU_c} \quad (3)$$

其中，子模块中 IGBT 器件型式选用 6500V/600A 规格，为保证电力电子器件的安全，在电压计算中预留出 1.3 的裕度值，可求出子模块平均电压 $U_c=6.5\text{kV}/1.3=5\text{kV}$ ，代入式（3）得：

$$n = \frac{15.56}{m} > 7.78 \quad (4)$$

为使主电路产生零电平，子模块数应为偶数，故取 $n=8$ 。

此时，直流侧电压等级为：

$$U_{dc} = nU_c = 40\text{kV} \quad (5)$$

3.2 子模块电容参数

取图 1 中任一桥臂 j 进行分析，其单桥臂等效电路如图 2 所示。

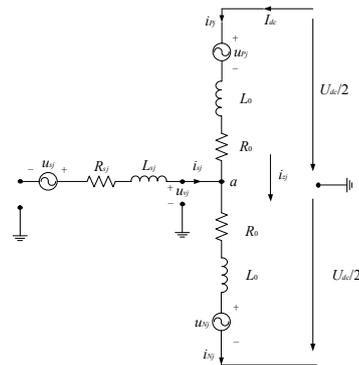


图 2 MMC_STATCOM 单桥臂等效电路

定义 MMC_STATCOM 输出的电压、电流调制比分别为：

$$\begin{cases} z = \frac{e_j}{U_{dc}/2} \\ k = \frac{I_s}{2} / \frac{I_{dc}}{3} \end{cases} \quad (6)$$

式中， e_j 为 j 相内部电动势， I_s 为交流输出线电流峰值。

根据图 2 所示的单桥臂等效电路可得：

$$\begin{cases} u_{pj}(t) = \frac{1}{2}U_{dc} - e_j(t) = \frac{1}{2}U_{dc} [1 - z \sin(\omega_0 t)] \\ i_{pj}(t) = \frac{1}{3}I_{dc} - \frac{1}{2}i_{sj} = \frac{1}{3}I_{dc} [1 + k \sin(\omega_0 t + \varphi)] \end{cases} \quad (7)$$

式中, ω_0 为基波角频率, φ 为负载功率因数角。

子模块电容平均储能值为:

$$W_C = \frac{1}{2}C_0 U_C^2 \quad (8)$$

式中, C_0 为子模块电容值。

理想情况下, 各桥臂的能量瞬时值应和子模块的电容储能相等, 可推算得子模块电容参数计算式:

$$C_0 = \frac{P_s}{3nz\omega_0 U_C^2} \left[1 - \left(\frac{z \cos \varphi}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

式中, 取装置额定功率 $P_s=4\text{MW}$, 子模块数 $n=8$, 子模块电容平均电压 $U_C=5\text{kV}$, 输出功率因数 $\cos\varphi=0.95$, 可得:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{4 \times 10^6}{3 \times 8 \times 314.16 \times 5000^2 z} \left[1 - \left(\frac{0.95z}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \\ &\approx \frac{(1 - 0.225z^2)^{\frac{3}{2}}}{47124z} \text{F} \end{aligned} \quad (10)$$

子模块电容参数的具体取值可根据仿真过程中 MMC_STATCOM 输出电压调制深度进行相应调整。

3.3 桥臂电感参数

定义桥臂环流中二倍频电压峰值为 U_{zm} , 二倍频电流峰值为 I_{zm} , 可得上、下桥臂的电压、电流为:

$$\begin{cases} u_{pj}(t) = \frac{1}{2}U_{dc} [1 - z \sin(\omega_0 t)] + \frac{U_{zm}}{2} \sin(2\omega_0 t + \varphi) \\ i_{pj}(t) = \frac{1}{3}I_{dc} [1 + k \sin(\omega_0 t + \varphi)] + I_{zm} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \\ u_{Nj}(t) = \frac{1}{2}U_{dc} [1 + z \sin(\omega_0 t)] + \frac{U_{zm}}{2} \sin(2\omega_0 t + \varphi) \\ i_{Nj}(t) = \frac{1}{3}I_{dc} [1 - k \sin(\omega_0 t + \varphi)] + I_{zm} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \end{cases} \quad (11)$$

此时 j 相桥臂的总瞬时功率为:

$$P_{sj} = u_{pj} \cdot i_{pj} + u_{Nj} \cdot i_{Nj} \quad (12)$$

j 相桥臂级联的子模块总电容储能为:

$$W_C = 2n \cdot \frac{1}{2} C_0 u_C^2(t) = n C_0 u_C^2(t) \quad (13)$$

忽略直流分量及高阶分量的影响, j 相桥臂的电容储能二倍频分量幅值应等于该桥臂总能量的二倍频分量幅值, 整理得:

$$L_0 = \frac{1}{8\omega_0^2 C_0 U_C} \left(\frac{P_{sj}}{3I_{zm}} + U_{dc} \right) \quad (14)$$

式中, 桥臂环流电流峰值 I_{zm} 按经验值取为 30A 。结合子模块

电容参数 C_0 的计算结果, 可推得桥臂电感参数 L_0 计算式如下:

$$L_0 \approx \frac{126z}{125(1 - 0.225z^2)^{\frac{3}{2}}} \text{H} \quad (15)$$

3.4 LC 滤波电路参数

定义 U_{sm} 为交流输出相电压 u_{sj} 的峰值, I_{sm} 为交流输出线电流 i_{sj} 的峰值, 则桥臂环流 i_{sj} 满足:

$$i_{sj} = \frac{u_{sj} i_{sj}}{U_{dc}} = \frac{U_{sm} I_{sm}}{2U_{dc}} \cos \varphi + \frac{U_{sm} I_{sm}}{2U_{dc}} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \quad (16)$$

直流侧电流 i_{dc} 为:

$$i_{dc} = \frac{U_{sm} I_{sm} \cos \varphi}{U_{dc}} \quad (17)$$

假定上、下桥臂平均分配直流电流 i_{dc} , 可得环流电流 i_{zj} 的有功分量为:

$$i_{zjd} = \frac{1}{2} i_{dc} = \frac{U_{sm} I_{sm} \cos \varphi}{2U_{dc}} \quad (18)$$

结合式 (16), 可得桥臂环流的无功分量为:

$$i_{zjq} = i_{sj} - i_{zjd} = \frac{U_{sm} I_{sm}}{2U_{dc}} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \quad (19)$$

当 LC 电路发生谐振时, 满足:

$$i_{zjq} = C \frac{du_C}{dt} \quad (20)$$

结合式 (19) 可得:

$$u_C = \frac{U_{sm} I_{sm}}{4C\omega_0 U_{dc}} \sin(2\omega_0 t + \varphi) \quad (21)$$

将滤波电容电压 u_C 的波动幅值限制在额定电压的 10% 内, 可得 C 取值范围为:

$$C \geq \frac{5U_{sm} I_{sm}}{2\omega_0 U_{dc}^2} \quad (22)$$

此时滤波电感参数为:

$$L = \frac{1}{4C\omega_0^2} \quad (23)$$

4 车 - 网并联补偿模型

4.1 MMC_STATCOM 仿真模型

4.1.1 子模块电容电压控制策略

沿用将稳压控制策略叠加到子模块调制的思路, 对子模块电容电压进行控制。该控制方法主要包括电容电压的稳压控制、均压控制及调制波的合成, 如图 3 所示。

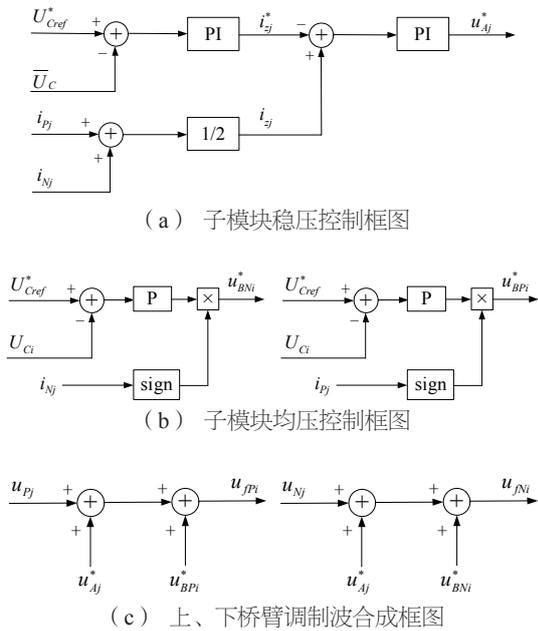


图3 子模块电容电压控制框图

4.1.2 并网协调控制策略

为满足 MMC_STATCOM 能较好控制并网运行时系统功率因数及无功功率的要求, 选用 dq 坐标系下有功无功解耦控制策略。

4.1.3 MMC_STATCOM 模型验证

令 MMC_STATCOM 工作于理想电源下, 测试其动态补偿性能。设置初始负载为 20Ω, 在 2s 时投入电阻值 20Ω、电感值 80mH 的阻感负载, 仿真结果如图 4 所示。

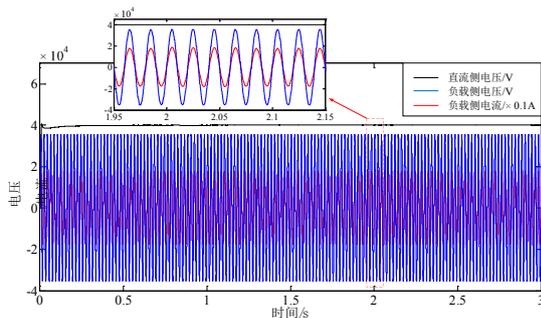


图4 MMC_STATCOM 仿真结果

图4中, 由于采用 PI 控制器进行调节, 直流侧电压存在一定超调, 于 0.3s 左右稳定在 40kV±200V, 满足式(5)中计算所得的直流电压等级; 2s 时投入阻感性负载, 直流侧电压可快速调节至稳态, 负载侧电压、电流可在 0.1s 内快速恢复同相工作状态, 动态响应较好, 验证了基于 dq 坐标系有功无功解耦控制方法的有效性。

4.2 车-网并联补偿仿真模型

MMC_STATCOM 装置按图 1 拓扑结构接入车-网模型。

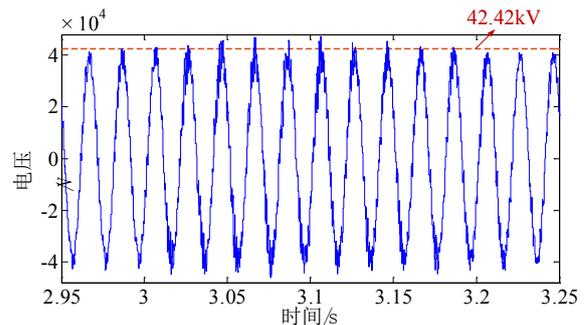
主变压器的接线方式采用 V/x 接线, 额定容量为 2×(20+20) MVA, 变比为 220 : 27.5 : 27.5; 自耦变压器额定容量为 25MVA, 变比为 1 : 1。车-网仿真模型参数如表 1 所示。

表 1 车-网仿真模型电气参数

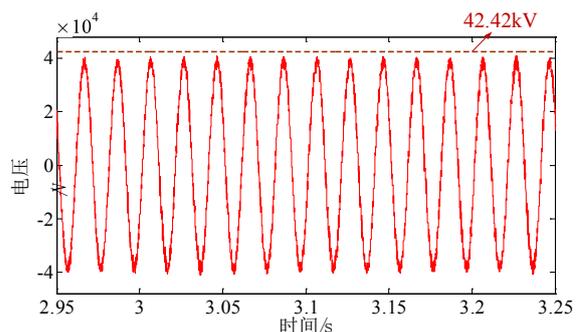
参数名称	参数值	参数名称	参数值
高压电缆电阻	0.014 mΩ/m	碳刷电阻	0.05 Ω
高压电缆电感	0.000 131 093 mH/m	支撑电容	9.01 mF
高压电缆电容	0.000 411 62 μF/m	电压比例参数	0.45
车体电阻	0.225 mΩ/m	电压积分参数	2.8
车体电感	0.001 103 375 mH/m	电流比例参数	0.65

5 车-网并联补偿仿真分析

设置模型目标速度指令 ω*: 0~1s, 电机启动并牵引加速至 210.25rad/s; 1s~3s, 电机转子维持在 210.25rad/s, 为制动提供准备条件; 3s 时进入制动工况, 目标速度指令下调为 0rad/s; 电机负载保持为 500N·m。其中, 仿真结果如图 5 所示。



(a) 投入 MMC_STATCOM 前 UT 仿真结果



(b) 投入 MMC_STATCOM 后 UT 仿真结果

图5 投入 MMC_STATCOM 前后车-网联合仿真结果

由图 5 可知, 原车-网模型制动工况下, 接触网电压峰值 $UT_{max}=42.80kV$, 超出安全电压峰值 42.42kV (有效值 30kV) 的范围; 投入 MMC_STATCOM 后, UT_{max} 基本稳定在 39.88kV (有效值 28.2kV) 的范围内, 满足牵引网电压安全要求。

(下转第 53 页)

施工管理中制定科学有效的措施。

第二,要建立健全科学有效的管理机制,能够让管理人员有制度可依,能够系统化地开展管理工作。

6 结语

自改革开放以来,中国市政道路施工技术水平和管理工作都在不断地提高。但是在提高的过程中,仍然存在许多的问题,这些问题导致市政道路工程的施工水平降低,为项目工程后期的使用带来了安全隐患。论文针对市政道路施工技术与管理的现状进行分析,并结合工程施工技术的要点和管理的要点进行阐述,分析施工技术与管理中问题并且给

出有效的优化方案,旨在进一步提升中国市政道路施工技术与管理水平的提高。

参考文献

- [1] 赵家飞.关于市政道路施工技术与管理措施探讨[J].建筑.建材.装饰,2018(13):273.
- [2] 熊家甲.市政道路路基施工技术与管理措施探讨[J].建材发展导向,2018,14(11):202-203.
- [3] 李仲卿.探讨市政道路工程路基施工技术及管理[J].建筑工程技术与设计,2018(14):3360.
- [4] 薛晓光.市政道路工程路基施工技术及管理探讨[J].建材与装饰,2017(42):224-225.

(上接第50页)

6 结论

动车组进入制动工况时,产生的再生制动能量可能会对牵引网供电安全造成威胁。针对这一问题,论文建立 MMC_STATCOM 模型,对车-网系统电压抬升进行抑制,得到结论如下:

①接触网电压、动车组中间直流环节电压、整流器输入电压波动范围均减小;

②动车组中间直流环节电压恢复稳态的响应时间缩短。

综上,该方案可有效改善制动工况下车-网系统相关电气量的不稳定现象^[8]。

参考文献

- [1] Župan I, Šunde V, Ban Ž, et al. Algorithm with temperature-dependent maximum charging current of a supercapacitor module in a tram regenerative braking system[J].Journal of Energy Storage, 2021(2):36.
- [2] Zhang J, Li Y, Xie H, et al. Urban Rail Transit Energy Storage Based on Regenerative Braking Energy Utilization[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2020(4):1549.

- [3] 陈浩.关于牵引网电压偏高问题的分析与对策[J].西铁科技,2016(4):15-18.
- [4] 王瀚艺,刘小涵.抑制再生制动引起的牵引网电压抬升方法研究[J].变频器世界,2017(8):88-94.
- [5] 黄文勋.复杂艰险山区列车再生制动对牵引网电压影响及相关抑制措施研究[J].铁道标准设计,2020,64(10):143-147.
- [6] Gruenbaum R. FACTS for Power Quality Improvement in Grids Feeding High Speed Rail Traction[C]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2007),Antalya,TURK EY,2007:618-623.
- [7] Shu Z, He X, Wang Z, et al.Voltage Balancing Approaches for Diode-Clamped Multilevel Converters Using Auxiliary Capacitor-Based Circuits[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(5):2111-2124.
- [8] Shu Z, Ding N, Chen J, et al. Multilevel SVPWM with DC-link Capacitor Voltage Balancing Control for Diode-clamped Multilevel Converter Based STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,60(5):1884-1896.