

一种新型的 MMC-RPC 功率控制策略

宋平岗,周振邦,董 辉

(华东交通大学 电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:为综合治理牵引供电系统中的电能质量问题,分析 V/v 变压器左右两侧供电臂上的功率关系,通过有功功率平衡、无功功率补偿以及谐波功率分离等方式综合治理无功功率、谐波、负序等电能质量问题。同时,在对基于模块化多电平铁路功率调节器(MMC-RPC)直接功率控制的基础上引入微分平坦控制理论。选取供电臂上的有功和无功功率作为系统的输出量,并结合微分平坦理论证明其满足微分平坦条件,使得整个 MMC-RPC 为微分平坦系统。控制系统由前馈控制与误差反馈控制两部分组成,前馈控制环节产生主控制量,反馈控制环节产生修正控制量。在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真系统,模拟不同的工况进行仿真,并与其他控制方式进行对比,所得结果验证了该控制策略的有效性与优越性。

关键词:模块化多电平换流器;铁路功率调节器;微分平坦理论;功率控制;比例积分控制器

中图分类号: U 223

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.007

0 引言

电气化铁路采用单相供电的方式,其牵引网上存在功率因数低、左右供电臂功率不平衡、谐波含量高的现象,同时还会在三相供电网中产生负序电流^[1-4]。上世纪 90 年代初,日本学者提出了铁路功率调节器(RPC)的概念,在采用 V/v 变压器的牵引供电系统中它由 2 个背靠背连接的单相换流器与 1 个中间直流环节构成,其具有在维持直流环节电压平衡的同时实现左右两侧供电臂上有功和无功功率交换、融通的功能^[5-7]。相比于其他电能质量治理设备,RPC 具有综合补偿、控制灵活、通用性强等优点^[8],但由于存在功率开关器件耐压能力有限、投资成本过高等问题,RPC 仅在日本的少数牵引变电所中得以实际应用,其大规模推广仍存在诸多阻碍^[9-10]。

文献[11-12]提出采用单相模块化多电平换流器(SPH-MMC)结构的 RPC,它以多个子模块串联的结构取代传统 RPC 桥臂上单一的开关器件^[13],基于模块化多电平的铁路功率调节器(MMC-RPC)相比于传统的 RPC 具有耐压等级高、补偿容量大、开关频率低等优点。

对于模块化多电平换流器(MMC)的控制策略,文献[11,14]在 MMC-RPC 输出电压和电流关系的基础上构建比例积分(PI)与比例谐振(PR)控制器,它们存在着非线性因素影响大、响应速度慢、稳态误差明显等缺陷。文献[15]针对基于模块化多电平的高压直流输电(MMC-HVDC)提出了一种无差拍的直接功率控制策略,在这种控制方式下可减少控制环节

参数的整定,直接对功率进行控制使得其响应速度快、动态特性好;文献[11]以 MMC-RPC 为对象设计了一种无需系统角频率及电感参数的直接功率控制方式,达到了简化控制器结构、高效稳定地治理牵引供电系统电能质量问题的效果。但是由于 MMC-RPC 为非线性系统,并且在实际应用中会受到诸多外界因素的影响,对其控制系统造成干扰,传统的功率控制无法实时地消除控制系统中的干扰量,难以很好地适应投入实际环境中的 MMC-RPC。

为此,本文提出一种基于微分平坦理论的直接功率控制策略。在 MMC-RPC 的功率关系中依照微分平坦理论^[16-18]选取了一组输出量,并证明其满足微分平坦条件,使 MMC-RPC 为微分平坦系统,控制器中采用前馈控制环节产生 SPH-MMC 期望的输出电压,同时结合误差反馈环节修正输出电压。该控制系统能抵御外界的干扰且无需精准的线性化模型就能精确、稳定地控制 MMC-RPC 的输出,综合治理牵引供电系统的电能质量问题。

1 MMC-RPC 数学模型

并联在采用 V/v 变压器的牵引变电所两侧的 MMC-RPC 如图 1 所示。V/v 变压器结构如左侧虚线框所示。MMC-RPC 由 4 个桥臂组成,每个桥臂由 N 个子模块串联而成,子模块结构如右侧虚线框所示。图中, R_s 、 L_s 分别为 MMC-RPC 交流侧传输线路上的电阻、电感; R_0 、 L_0 分别为桥臂上的电阻、电感; i_c 为变压器的对地电流; u_{jkt} 为桥臂上 N 个子模块的电压和, i_{jkt} 为流过其的电流, $j=L,R$ 表示左、右两侧供电臂, $k=a,b$ 表示一侧 SPH-MMC 的 a、b 相, $t=p,n$ 表示 SPH-MMC 中某相中上(p)、下(n)2 个桥臂; u_{jc} 为左右两侧 SPH-MMC 输出的电压(未经过输电线路);

收稿日期:2016-12-29;修回日期:2017-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51367008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51367008)

u_{dc} 为中间直流环节的电压; u_{jk} 为 j 侧 SPH-MMC 交流输出端口 k 相节点电压; i_j 为流入 j 侧 SPH-MMC 的电流; u_j 、 i_{wj} 分别为 j 侧供电臂上的电压、电流。

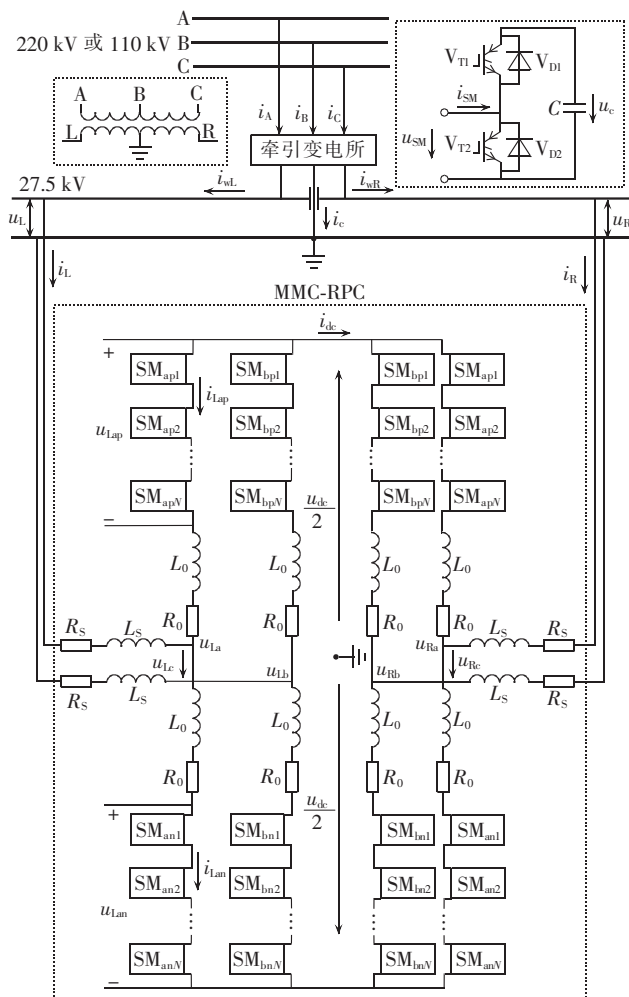


图 1 MMC-RPC 拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram of MMC-RPC

根据基尔霍夫电压定律,SPH-MMC 交流侧有如下关系:

$$u_{jc} = u_{ja} - u_{jb} = u_j - 2R_s i_j - 2L_s \frac{di_j}{dt} \quad (1)$$

SPH-MMC 直流侧电压有如下关系:

$$\begin{cases} \frac{u_{dc}}{2} = u_{jkp} + L_0 \frac{di_{jkp}}{dt} + R_0 i_{jkp} + u_{jk} \\ \frac{u_{dc}}{2} = u_{jkn} + L_0 \frac{di_{jkn}}{dt} + R_0 i_{jkn} - u_{jk} \end{cases} \quad (2)$$

将方程组(2)中的两项相加,可得直流侧电压为:

$$u_{dc} = u_{jkp} + u_{jkn} + L_0 \frac{d(i_{jkn} + i_{jkp})}{dt} + R_0 (i_{jkn} + i_{jkp}) \quad (3)$$

将方程组(2)中的两项相减,可得交流输出端口节点的电压为:

$$u_{jk} = \frac{u_{jkp} - u_{jkn}}{2} + \frac{L_0}{2} \frac{d(i_{jkn} - i_{jkp})}{dt} + \frac{R_0}{2} (i_{jkn} - i_{jkp}) \quad (4)$$

由以上关系式可知,可以通过控制 MMC-RPC 桥

臂上子模块的投入与切除,改变其电压和与电流,进而达到控制交流侧输出的作用。

2 功率补偿原理与计算

本文从功率角度出发,对牵引供电系统中的电能质量问题进行分析,令左右两侧牵引供电臂上的有功功率、无功功率分别为 p_j 、 q_j 。图 2 为存在电能质量问题的牵引供电系统中电压、电流与功率的相量关系图以及消除其电能质量问题后,理想状态下的相量关系。假设此牵引供电系统中 R 侧重载、L 侧轻载,图中 u_i ($i=A, B, C$) 为 V/v 变压器原边 A、B、C 三相电压相量, p'_j 、 q'_j 为补偿后理想状态下供电臂上的功率, P_{j_ref} 、 Q_{j_ref} 为治理过程中,MMC-RPC 需向供电臂补偿的功率。

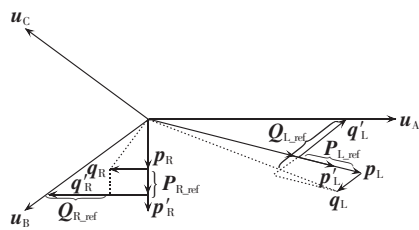


图 2 功率补偿相量图

Fig.2 Phasor diagram of power compensation

2.1 补偿功率计算

由图 2 可知,MMC-RPC 需向供电臂补偿的有功功率、无功功率为:

$$\begin{cases} P_{L_ref} = \frac{P_L - p_R}{2}, Q_{L_ref} = -q_L - p'_L \tan \frac{\pi}{6} \\ P_{R_ref} = \frac{P_R - p_L}{2}, Q_{R_ref} = q_R - p'_R \tan \frac{\pi}{6} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $p'_L = p'_R = \frac{P_L + P_R}{2}$ 为理想有功功率; $\frac{\pi}{6}$ 为理想情况下的功率因数角。由于牵引网中存在大量的谐波,相应的 MMC-RPC 应补偿其中的谐波功率,由文献[9]可以知道 MMC-RPC 向供电臂注入的总的补偿功率为:

$$\begin{cases} P_{cL_ref} = \frac{P_L - p_R}{2} - P_{LH} \\ P_{cR_ref} = \frac{P_R - p_L}{2} - P_{RH} \\ Q_{cL_ref} = -q_L - p'_L \tan \frac{\pi}{6} - Q_{LH} \\ Q_{cR_ref} = q_R - p'_R \tan \frac{\pi}{6} - Q_{RH} \end{cases} \quad (6)$$

其中, Q_{LH} 、 Q_{RH} 为两侧供电臂上的谐波功率,具体计算可参见文献[11]。

2.2 实时功率测量

由于牵引变压器副边两侧供电臂上为单相交流电,故无法直接采用传统的三相交流系统求取功率

的方式来计算其功率。文献[19-20]提出采用二阶广义积分(SOGI)的方式构造与实际量正交的虚拟分量。基于此,本文采用 SOGI 构造电压、电流的正交分量,分别用 α 、 β 表示实际量、虚拟量,由此可求出供电臂上的实时功率如式(7)所示,值得指出的是,对于 MMC-RPC 输出的实时功率、基波功率、谐波功率都是采用如下功率计算公式。

$$\begin{bmatrix} p_{jn'} \\ q_{jn'} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{j\alpha} & u_{j\beta} \\ u_{j\beta} & -u_{j\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{wj\alpha n'} \\ i_{wj\beta n'} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, n' 取 1、2、3、... 分别表示基波和 2、3、... 次谐波。

根据以上 MMC-RPC 补偿功率的计算,可得功率综合补偿计算框图如图 3 所示。

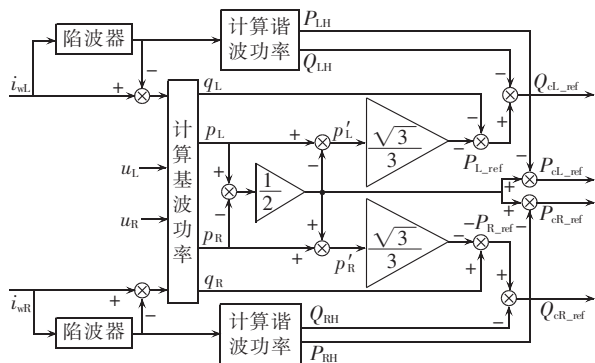


图 3 功率综合补偿计算框图

Fig.3 Calculation block diagram of power comprehensive compensation

图 3 中的陷波器能在电流基波频率(50 Hz)处产生无穷小的增益,即可过滤出供电臂电流中的基波成分,由此可为后续基波功率、谐波功率的计算做好“分流”的准备^[21]。

3 基于微分平坦的直接功率控制器设计

3.1 MMC-RPC 直接功率控制原理

对于 MMC-RPC 中交流侧的电压、电流,通过 SOGI 可变换为 α 、 β 分量的形式,则式(1)可变换为:

$$u_{j\alpha\beta} = u_{j\alpha\beta} - 2L_S \frac{di_{j\alpha\beta}}{dt} - 2R_S i_{j\alpha\beta} \quad (8)$$

设供电臂上的 α 、 β 分量电压为 $u_{j\alpha} = U_j \cos(\omega t)$, $u_{j\beta} = U_j \sin(\omega t)$,结合式(8),可得交流侧电压、电流导数的表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{di_{j\alpha\beta}}{dt} = \frac{u_{j\alpha\beta} - u_{j\alpha\beta} - 2R_S i_{j\alpha\beta}}{2L_S} \\ \frac{du_{j\alpha}}{dt} = -\omega U_j \sin(\omega t) = -\omega u_{j\beta} \\ \frac{du_{j\beta}}{dt} = \omega U_j \cos(\omega t) = \omega u_{j\alpha} \end{cases} \quad (9)$$

将式(7)中的供电臂电流矩阵换为 MMC-RPC 交流侧电流 $i_{j\alpha}$ 、 $i_{j\beta}$,即可求得 MMC-RPC 实时输出的功率 p_{ej} 、 q_{ej} 的表达式,对实时输出的功率求导并把式(9)中的导数关系代入,可得 MMC-RPC 端口电压与

传输功率之间的关系为:

$$\begin{cases} u_{j\alpha} = u_{j\alpha} - \frac{u_{j\alpha} w_{pj} + u_{j\beta} w_{qj}}{U_j^2} \\ u_{j\beta} = u_{j\beta} - \frac{u_{j\beta} w_{pj} - u_{j\alpha} w_{qj}}{U_j^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中,定义的中间变量 w_{pj} 、 w_{qj} 如式(11)所示。

$$\begin{cases} w_{pj} = 4 \left(L_S \frac{dp_{ej}}{dt} + R_S p_{ej} + \omega L_S q_{ej} \right) \\ w_{qj} = 4 \left(L_S \frac{dq_{ej}}{dt} + R_S q_{ej} - \omega L_S p_{ej} \right) \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可见,有功功率、无功功率之间存在耦合关系,为实现直接功率控制需要对其进行解耦,解耦环节将于下文 3.3 节中详述。

3.2 MMC-RPC 功率平坦性论证

微分平坦理论在飞行器的轨迹规划、卫星位置调整以及机器人的运动设计中具有显著的运算效率与优良的控制性能^[16,22]。近年来,微分平坦理论在 PWM 整流器、电机控制、光伏逆变、MMC 控制器等电力电子领域中已有使用^[18,23-24]。

对于任意一个非线性系统,若可用系统中的一组输出向量连同其有限阶导数一起表示该系统中所有的状态变量与输入变量,则该系统为微分平坦系统,亦可称其满足微分平坦条件,由此可对其使用微分平坦理论进行设计。

对于 MMC-RPC 系统,从 3.1 节其功率关系式中选择输出功率 $[p_{ej}, q_{ej}]^T$ 为系统状态变量,用 $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$ 表示,同时令输出功率为输出变量 $\mathbf{z}$, $\mathbf{z} = [z_1, z_2]^T$,最后选取 MMC-RPC 输出端口电压 $[u_{j\alpha}, u_{j\beta}]^T$ 为输入变量 $\mathbf{y}$,用 $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T$ 表示。由式(10)、(11)可知:

$$\begin{cases} y_1 = u_{j\alpha} - \frac{4u_{j\alpha}(L_S \dot{z}_1 + R_S z_1 + \omega L_S z_2)}{U_j^2} - \frac{4u_{j\beta}(L_S \dot{z}_2 + R_S z_2 - \omega L_S z_1)}{U_j^2} = f_1(z_1, z_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2) \\ y_2 = u_{j\beta} - \frac{4u_{j\beta}(L_S \dot{z}_1 + R_S z_1 + \omega L_S z_2)}{U_j^2} - \frac{4u_{j\alpha}(L_S \dot{z}_2 + R_S z_2 - \omega L_S z_1)}{U_j^2} = f_2(z_1, z_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2) \end{cases} \quad (12)$$

由于输出功率既是状态变量也是输出变量,故有:

$$\begin{cases} x_1 = z_1 = f_3(z_1, z_2) \\ x_2 = z_2 = f_4(z_1, z_2) \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)、(13)可知,在 MMC-RPC 系统中选取的状态变量与输入变量可由选定的输出向量及其有限阶导数表示,故上述选取方式能使得 MMC-RPC 满足微分平坦系统的条件,可对其使用微分平坦定理。

3.3 控制器设计

由式(12)、(13)可知,若已知 MMC-RPC 的输出

FBC-DPC)系统整体控制框图。

考虑到功率计算环节计算得到的期望功率轨迹可能不满足平滑性的要求,故在图 5 中的功率平坦控制器前增加一个低通滤波器(LPF),以满足输入平滑的期望功率的要求^[27]。

4 仿真分析

为验证本文提出的新型功率控制策略的可行性与优越性,参照图 1 在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建 V/v 牵引变压器牵引供电系统中的 MMC-RPC 仿真模型。变压器原边的三相电网使用 220 V/50 Hz 的电压,牵引供电系统及 MMC-RPC 中的仿真参数如下:供电额定电压 $u_R=u_L=27.5$ kV,供电额定频率为 50 Hz,MMC 直流侧电压 $u_{dc}=55$ kV,MMC 桥臂子模块数量 $N=20$,子模块电容 $C=20$ mF,交流侧电感 $L_s=5$ mH,交流侧电阻 $R_s=0.5$ Ω ,直流侧电感 $L_{dc}=1$ mH,直流侧电阻 $R_{dc}=1$ Ω 。

4.1 电流波形

仿真模拟一种两侧供电臂不平衡的现象,通过网侧与供电臂上的电流波形,验证 MMC-RPC 对牵引供电系统中不平衡现象的治理效果。设置右侧供电臂供应有功功率为 15 MW、无功功率为 3 Mvar 的电力机车运行,左侧供电臂区间暂无机车运行,0.15 s 时投入 MMC-RPC 进行治理。图 6 和 7 从上至下依次为 MMC-RPC 在传统双闭环 PI 控制器、直接功率控制器以及基于微分平坦的直接功率控制器的作用下三相电网电流波形和两侧供电臂上的电流波形。

从图 6 和图 7 可知,相比于传统的双闭环 PI 控制,2 种功率控制作用下系统响应速度更快,电流达到平衡状态的时间更短,并且平衡度更高;相比于直接功率控制,基于微分平坦的直接功率控制作用下系统稳定性更强,在投入 MMC-RPC 治理的瞬间几乎不产生电流波动,三相电流与两侧供电臂上的电流能

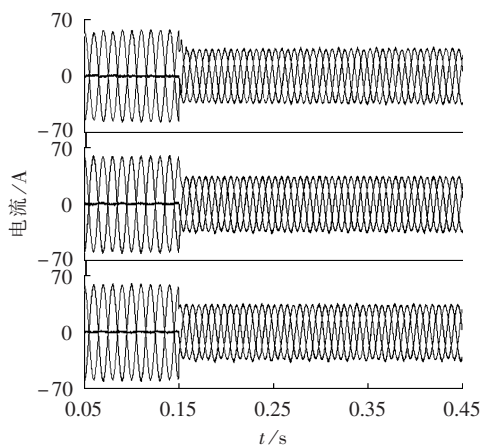


图 6 3 种控制方式下三相电网电流波形
Fig.6 Waveforms of three-phase grid current in three control modes

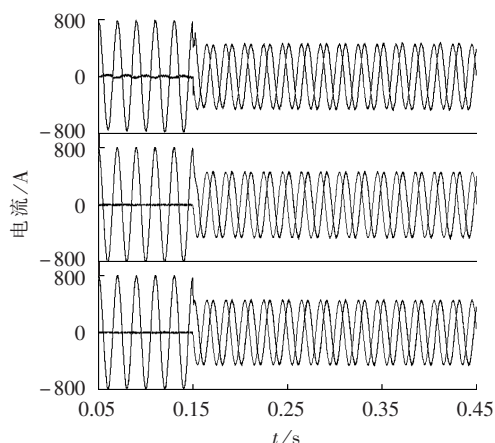


图 7 3 种控制方式下供电臂电流波形
Fig.7 Waveforms of power supply arm current in three control modes

快速、平稳地进入平衡状态。

4.2 功率波形

仿真模拟与 4.1 节中相同的工况及操作,得到 2 种功率控制作用下 MMC-RPC 左右两侧输出的功率与利用功率综合补偿计算得到的期望输出功率的对比,如图 8 所示。

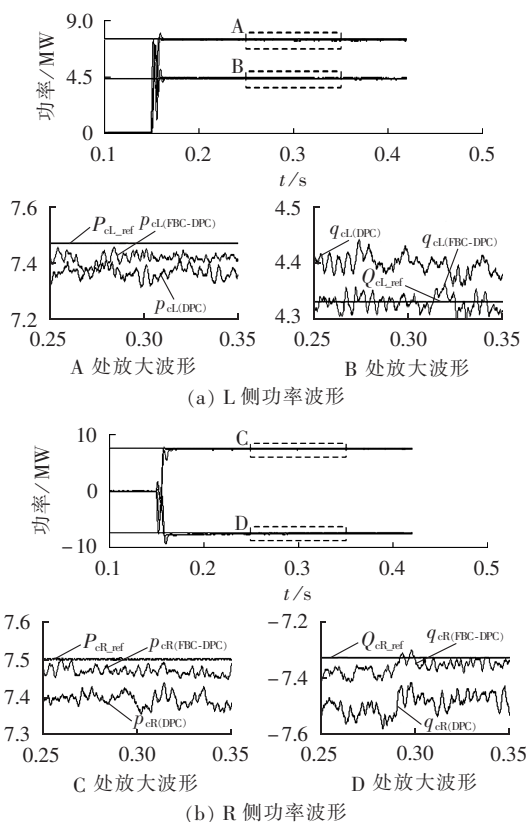


图 8 2 种功率控制方式下输出功率波形对比
Fig.8 Comparison of output power waveforms in two power control modes

从图 8 可以看出,直接功率控制与基于微分平坦的直接功率控制作用下的 MMC-RPC 左右两侧功率在 0.15 s 后均能较好地跟踪期望功率。对功率波形进行局部放大(取 0.25~0.35 s)如图中 A、B、C、D 4

个区域所示,观察其放大波形可知,相比于直接功率控制,基于微分平坦的直接功率控制下 MMC-RPC 输出的功率更趋近于期望的输出功率,同时其也表现出较好的稳定性与响应速度。

4.3 2 种工况下基于微分平坦的直接功率控制的电流波形

为进一步检验基于微分平坦的直接功率控制下 MMC-RPC 在不同的工况中都能有效地治理牵引系统中的电能质量问题,仿真模拟 2 种常见的实际工况,并观察三相网侧电流波形与左右两侧供电臂上电流波形。

工况 1:供电区段中有一辆有功功率为 7.2 MW、无功功率为 0.14 Mvar 的电力机车,0.15 s 时机车从左侧供电臂驶入供电死区,0.3 s 时机车驶入右侧供电臂区间。对此工况进行仿真,得到的电流波形如图 9 所示。

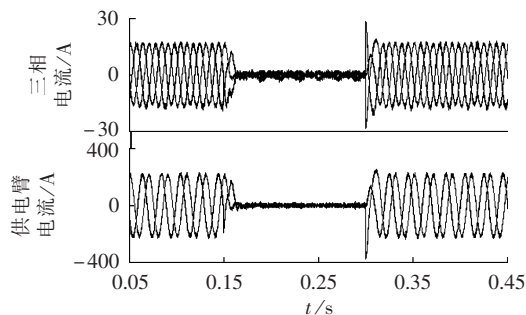


图 9 工况 1 下电流波形

Fig.9 Waveforms of currents under Condition 1

从图 9 可知,负载发生变化后,供电臂上的电流能很快地达到平衡状态,同时三相电网中的电流也能尽快地达到三相平衡状态。

工况 2:右侧供电臂上暂无机车接入,左侧供电臂上有功率为 7.2 MW、功率因数为 0.98 的电力机车运行,0.25 s 时有 2 辆同种类型机车于左侧供电臂区间升弓运行。对此工况进行仿真,得到的电流波形如图 10 所示。

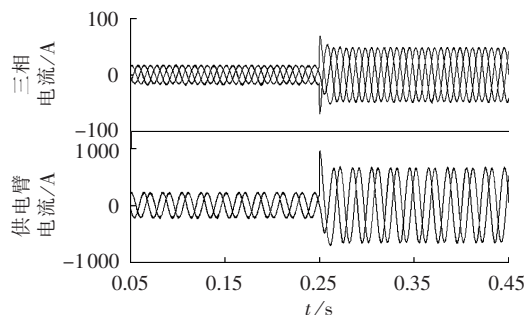


图 10 工况 2 下电流波形

Fig.10 Waveforms of currents under Condition 2

从图 10 可知,供电臂负载突变后,电流能很好地进入新的平衡状态,进一步验证了本文所提功率控制具有优良的特性。

5 结论

a. 本文结合微分平坦理论设计了一种新型的功率控制策略,采用前馈控制与反馈控制相结合的方法构造 MMC-RPC 的新型功率控制器,无需精确的电感参数,同时对 SPH-MMC 实现了独立的功率解耦控制。

b. 采用微分平坦理论使得输出量的轨迹能更为精确地跟踪期望值,仿真结果中的输出功率波形对比有效地验证了该控制方式的优越性。

c. 对不同工况及不同控制方式下 MMC-RPC 引入牵引供电系统治理进行仿真,可以得知基于微分平坦的直接功率控制策略能有效地应对牵引线路中的变化,迅速、稳定地使电流达到平衡状态,进一步验证了这种新型功率控制方式具有响应速度快、动态特性和稳态特性优良等特点。

参考文献:

- [1] 张晨萌,陈柏超,袁佳歆,等. 基于 V/v 牵引变压器的同相供电系统电能质量混合补偿研究[J]. 电工技术学报,2015,30(12):496-504.
ZHANG Chenmeng, CHEN Baichao, YUAN Jiaxin, et al. Research on a hybrid compensation system for V/v co-phase railway power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 496-504.
- [2] MOUSAVI G S M, TABAKHPOUR L A, FUCHS E F, et al. Power quality issues in railway electrification: a comprehensive perspective[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3081-3090.
- [3] 张志文,陈明飞,胡斯佳,等. 基于星形三角形接线多功能平衡变压器的负序和谐波综合治理系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):159-165.
ZHANG Zhiwen, CHEN Mingfei, HU Sijia, et al. Comprehensive negative-sequence and harmonic suppression system based on Y-D multi-function balance transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 159-165.
- [4] 江睿,刘光晔,邹宇. 电气化铁路用 Yd11 型变压器两相平衡协调控制系统[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):85-90.
JIANG Rui, LIU Guangye, ZOU Yu. Two-phase-balance coordinated control system of Yd11 traction transformer for electric railroad[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 85-90.
- [5] HU S, BIN X Y L, GAO X, et al. A power factor-oriented railway power flow controller for power quality improvement in electrical railway power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1167-1177.
- [6] KOJABADI H M, KALEYBAR H J, FALLAH M, et al. Capacity diminution of railway power conditioner using a new smart control system[C]//8th International Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2016: 2097-2102.
- [7] 张鑫,江全元. 基于 V/v 接线变压器的铁路功率调节器容量配置和能量优化补偿策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):102-108.
ZHANG Xin, JIANG Quanyuan. Capacity configuration of V/v transformer-based railway power conditioner and optimal energy compensation strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,

- 2014,34(1):102-108.
- [8] 胡斯佳,张志文,李勇,等. 一种采用 LC 耦合的电气化铁道功率调节系统[J]. 电工技术学报,2016,31(8):199-211.
HU Sijia,ZHANG Zhiwen,LI Yong,et al. An LC-coupled electric railway static power conditioning system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(8):199-211.
- [9] OHMI M,YOSHII Y. Validation of railway static power conditioner in Tohoku Shinkansen on actual operation[C]//IEEE Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo,Japan;IEEE,2010:2160-2164.
- [10] LAO K,WONG M,DAI N Y,et al. Analysis in the effect of co-phase traction railway HPQC coupled impedance on its compensation capability and impedance-mapping design technique based on required compensation capability for reduction in operation voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,32(4):2631-2646.
- [11] 宋平岗,林家通,李云丰,等. 基于模块化多电平铁路功率调节器直接功率控制策略[J]. 电网技术,2015,39(9):2511-2518.
SONG Pinggang,LIN Jiatong,LI Yunfeng,et al. Direct power control strategy of railway static power conditioner based on modular multilevel converter[J]. Power System Technology,2015,39(9):2511-2518.
- [12] SONG S,LIU J,OUYANG S. A modular multilevel converter based railway power conditioner for power balance and harmonic compensation in Scott railway traction system[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei,China;IEEE,2016:2412-2416.
- [13] 宋平岗,林家通,李云丰. 基于 MMC 铁路功率调节器的环流分析与抑制策略[J]. 高电压技术,2016,42(11):3539-3547.
SONG Pinggang,LIN Jiatong,LI Yunfeng. Circulating current analysis and suppressing controller designing of the MMC based on railway static power conditioner [J]. High Voltage Engineering,2016,42(11):3539-3547.
- [14] MA F,XU Q,HE Z,et al. A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2016,2(1):96-109.
- [15] 梁营玉,杨奇逊,刘建政,等. 电网电压不平衡时 MMC-HVDC 的无差拍直接功率控制[J]. 电工技术学报,2015,30(15):15-25.
LIANG Yingyu,YANG Qixun,LIU Jianzheng,et al. Deadbeat direct power control for MMC-HVDC under unbalanced grid voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(15):15-25.
- [16] XIA Y,PU F,LI S,et al. Lateral path tracking control of autonomous land vehicle based on ADRC and differential flatness[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(5):3091-3099.
- [17] 蔡伟伟,杨乐平,刘新建,等. 基于微分平坦的高超声速滑翔飞行器轨迹规划[J]. 国防科技大学学报,2014(2):61-67.
CAI Weiwei,YANG Leping,LIU Xinjian,et al. Differential flatness based trajectory planning for hypersonic glide vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology,2014(2):61-67.
- [18] 宋平岗,李云丰,王立娜,等. 基于微分平坦理论的多电平换流器控制器设计[J]. 电网技术,2013,37(12):3475-3481.
SONG Pinggang,LI Yunfeng,WANG Lina,et al. Differential flatness based design of controller for modular multilevel converter [J]. Power System Technology,2013,37(12):3475-3481.
- [19] JAIN C,SINGH B. An offset reduction second order generalized integrator based control algorithm for single-phase S-DSTATCOM [C]//Systems Conference. Noida,India;IEEE,2015:1-6.
- [20] PATIL K R,PATEL H H. Modified dual second-order generalised integrator FLL for synchronization of a distributed generator to a weak grid[C]//Environment and Electrical Engineering. Florence,Italy;IEEE,2016:1-5.
- [21] 张奔奔,胥芳,吴乐彬,等. LCL 型并网逆变器自适应谐振抑制[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(1):180-185.
ZHANG Benben,XU Fang,WU Lebin,et al. Adaptive resonance damping of LCL filtered grid-connected inverter[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2016,50(1):180-185.
- [22] YU J,CAI Z,WANG Y. Optimal trajectory generation of a quadrator based on the differential flatness[C]//Control and Decision Conference. Yinchuan,China;IEEE,2016:678-683.
- [23] THOINTHONG P,SIKKABUT S,POONNOY N. Differential flatness based speed/torque control with state-observers of permanent magnet synchronous motor drives[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. [S.l.]:IEEE,2016:1-8.
- [24] JAMSHIDPOUR E,POURE P,NAHID-MOBARAKEH B,et al. Differential flatness-based control of a stand-alone solar-PV energy generating system[C]//IEEE Conference on Control Applications(CCA). [S.l.]:IEEE,2015:721-726.
- [25] 刘炜,王朝亮,赵成勇,等. 基于自抗扰控制原理的 MMC-HVDC 控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):87-93.
LIU Wei,WANG Zhaoliang,ZHAO Chengyong,et al. ADRC-based controller for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):87-93.
- [26] 张芳,张光耀,李传栋. MMC-HVDC 的二阶线性自抗扰控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):92-98.
ZHANG Fang,ZHANG Guangyao,LI Chuandong. Second-order linear active disturbance rejection control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):92-98.
- [27] 范立新,郭浩,顾文,等. 基于储能与桨距角协调控制的风电功率波动平抑方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):100-105.
FAN Lixin,GUO Hao,GU Wen,et al. Wind power fluctuation suppression based on control coordination between energy storage and pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):100-105.

作者简介:



宋平岗 (1965—),男,江西新余人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力电子与新能源(E-mail:pgsong@ecjtu.edu.cn);
周振邦(1993—),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为高压直流输电(E-mail:apabang@qq.com);
董辉(1990—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail:651054223@qq.com)。

(下转第98页 continued on page 98)

- improvement of general power theory based on periodic function space[J]. Jiangxi Electric Power, 2008, 32(6): 20-26.
- [13] JEON S J. Unification and evaluation of the instantaneous reactive power theories [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1502-1510.
- [14] 胡文彪, 马伟明. 基于周期函数空间的通用功率定义[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 64-70.
- HU Wenbiao, MA Weiming. A universal definition of power based on periodic function space[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 64-70.
- [15] 付志红, 熊学海, 侯兴哲, 等. Fryze 时域无功与通用无功定义的一致性条件分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 59-65.
- FU Zhihong, XIONG Xuehai, HOU Xingzhe, et al. Analysis of coherence condition for Fryze time-domain reactive power definition and universal reactive power definition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 59-65.
- [16] 梁玉娟. 关于电势参考点选择的几个问题[J]. 河池师专学报, 1999, 19(2): 43-45.
- LIANG Yujuan. Some problem on the selection of potential reference point[J]. Journal of Hechi Teachers College, 1999, 19(2): 43-45.
- [17] 韦群, 张家政. 零电势参考点的选择[J]. 武汉师范学院学报, 1983(1): 133-139.
- WEI Qun, ZHANG Jiazheng. Selection of zero potential reference point[J]. Journal of Wuhan Teachers College, 1983(1): 133-139.

作者简介:



田铭兴

田铭兴(1968—),男,甘肃民勤人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统电能质量分析与控制、电机设计及其控制系统、电力电子技术及其应用等(E-mail: tianmingxing@mail.lzjt.cn);

王江彬(1990—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,研究方向为多端电路功率理论;

赵远鑫(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为混合补偿系统容量计算及优化。

Reference point selection method in definition of power theory

TIAN Mingxing^{1,2}, WANG Jiangbin^{1,2}, ZHAO Yuanxin^{1,2}

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province Engineering Laboratory for Rail Transit Electrical Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The problem of reference point selection in the definition of power theory is very basic but has not got a uniform solution. Firstly, the constraint condition of reference point selection is determined according to the demand of KCL(Kirchhoff's Current Law) which must be met by the terminal currents of a multi-terminal circuit. Secondly, the uniqueness of the reference point selection under the constraint condition is proved, and the unique reference point satisfying the constraint condition is selected from many alternative reference points. Finally, the specific method of reference point selection is given, and the reference point selection method is simplified from the perspective of engineering application. Taking the generalized instantaneous power theory as an example, the proposed method is further explained and its compatibility is discussed, and the current decomposition method and the power definition method employed by the generalized instantaneous power theory are modified to make the power of a specific circuit be a unique determined value.

Key words: power theory; multi-terminal circuit; reference point; constraint condition

(上接第 58 页 continued from page 58)

A novel power control strategy for MMC-RPC

SONG Pinggang, ZHOU Zhenbang, DONG Hui

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to harness the power quality problems of traction power supply system comprehensively, the power relationship between the left and right power supply arm of a V/v transformer is analyzed. The reactive power, harmonic, negative sequence and other power quality problems are comprehensively harnessed by means of active power balance, reactive power compensation, harmonic power separation and so on. Meanwhile, the differential flatness control theory is introduced to the direct power control for MMC-RPC (Railway Power Conditioner based Modular Multilevel Converter). The active power and reactive power of the power supply arm are selected as the output of the system, in which the differential flatness condition can be satisfied according to the differential flatness theory. Consequently, the whole MMC-RPC system is a differential flatness system. The control system consists of two parts, feed forward control and error feedback control. The feed forward control provides the main control variables, while the feedback control corrects the error. The simulation system considering different conditions is built on MATLAB/Simulink. Simulative results verify the effectiveness and superiority of the proposed control strategy compared with other control methods.

Key words: modular multilevel converter; railway power conditioner; differential flatness theory; power control; proportional integral controller