

# 基于 SOGI-FLL 的 MMC-RPC 控制器设计

宋平岗, 龚家康, 周振邦

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 针对牵引供电系统中频率自适应性能差、谐波污染严重等电能质量问题, 在传统二阶广义积分器(SOGI)的基础上, 结合锁频环(FLL)提出了一种新型的 SOGI-FLL 结构。在采用模块化多电平换流器结构的铁路功率调节器(MMC-RPC)中使用该结构, 能够提高系统频率的跟踪能力, 加快响应速度, 且能有效治理谐波, 提高电能质量。在 Matlab 中搭建基于新型 SOGI-FLL 的 MMC-RPC 仿真系统模型, 仿真结果和理论分析证实了该新型 SOGI-FLL 运用到 MMC-RPC 系统中的可行性及有效性。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 铁路功率调节器; 二阶广义积分器; 锁频环

**DOI:** 10.12067/ATEEE1710060      **文章编号:** 1003-3076(2018)05-0012-09      **中图分类号:** TM72

## 1 引言

铁路牵引供电系统中常常采用大量的 V/v 牵引变压器, 负载不等的若干供电区间产生了大量的负序电流。同时, 机车的运行也向供电系统注入了大量的谐波, 使得牵引网中存在谐波、负序等诸多的电能质量问题<sup>[1,2]</sup>。

为了治理铁路供电系统中的负序、谐波等电能质量问题, 1993 年日本学者首次提出了铁路功率调节器(Railway static Power Conditioner, RPC)的治理方案, 并在日本得到了广泛的应用, 取得了一系列的成果<sup>[3,4]</sup>。传统 RPC 联入电网需经过降压变压器等诸多的配套设备, 使得其结构极其复杂, 且体积和造价不符合实际工程的应用<sup>[5,6]</sup>。有学者提出采用模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)结构的铁路功率调节器(MMC-RPC), 可无需变压器便可直接接入牵引供电网, 且能够避免直流侧带来的散热、谐波等复杂问题<sup>[6]</sup>。

文献[7]对 MMC-RPC 采用一种与虚拟惯性相结合的功率同步控制策略, 使其具有同步电机转子的惯性, 不仅可以为系统提供惯性支持, 而且可以提高系统的稳定性及抗扰动能力。文献[8,9]为更好地治理牵引供电系统中的负序、谐波等问题, 对

MMC-RPC 采用了模糊控制策略, 该控制策略在跟踪系统误差时, 具有受非线性因素影响较小等优势。文献[10]为治理铁路牵引供电系统中的负序及无功功率补偿, 采用了电压外环、电流内环的双闭环控制策略, 不仅可以较好地实现治理效果, 且结构相对简单。但以上控制策略均未考虑当系统频率发生突变时, 频率的自适应及其抗扰动的能力。

文献[11]在传统二阶广义积分器(Second Order Generalized Integrator, SOGI)的基础上, 结合锁频环(Frequency Locked Loop, FLL)提出了一种新型的 SOGI-FLL 结构, 在非理想条件下的分布式系统中, 对多功能太阳能光伏系统采用 SOGI-FLL。当系统频率发生振荡时, FLL 能有效减小输出电流相位、幅值的偏差, 不仅提高了系统的电能质量, 而且加强了对系统频率跟踪的能力, 有利于系统的整体稳定性。文献[12,13]分别在实现风力发电并网逆变的系统 and 异步电机同步机频率算法中, 采用了基于双二阶广义积分器的锁频环, 使得频率具有更为优越的平滑效应, 能够保证风力发电系统的顺利并网运行和更优异的电机动态性能。文献[14,15]分别对公共电网中的同步故障和直流输电系统中的正序电压与相位进行检测。当系统采用 SOGI-FLL 时, FLL 呈现出能够更加快速有效地响应频率、相位

**收稿日期:** 2017-10-31  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51367008)  
**作者简介:** 宋平岗(1965-), 男, 江西籍, 教授, 博士, 主要研究方向为电力电子与新能源;  
龚家康(1993-), 男, 江西籍, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电。

和幅值变化的效果。不仅具有良好的检测功效,而且结构相对其他检测方式较为简单。当系统频率发生变化时,鲜有文献对采用 SOGI-FLL 来提升 MMC-RPC 的频率自适应性进行相关研究。

本文提出一种新型 SOGI-FLL 结构<sup>[14-16]</sup>。该结构不仅具有传统 SOGI 可有效抑制谐波的特性,还能够对输入信号的频率进行实时追踪,提高 SOGI-FLL 的锁相精度和频率的自适应性。最后,理论分析和 Matlab 中的仿真实验结果表明,此结构在 MMC-RPC 中具有可行性和稳定性,不仅可以抑制谐波,还能增加频率的自适应性。

## 2 MMC-RPC 基本原理

采用 V/v 牵引变压器的 MMC-RPC 牵引供电系统的结构示意图如图 1 所示。在 V/v 牵引变压器原边上的三个端子分别与公共电网的 A、B、C 三相连接,经过变压器将电网等级为 110kV (或 220kV) 的三相转化为两相 27.5kV 的单相电。牵引网上的单相电分别用 L、R 表示,与变压器的二次侧相连。两个单相模块化多电平换流器 (SPH-MMC) 背靠背构成了 RPC,且分别接入供电臂中。每个 SPH-MMC 均由 a、b 两相构成,每相又分为上下两个桥臂,每个桥臂上都有  $N$  个 H 桥子模块 (SM)。从公共电网流入牵引网的电流可以表示为  $i_j$  ( $j = L, R$ ),从牵引网流入 RPC 的电流则表示为  $i_{jk}$  ( $k = a, b$ )。

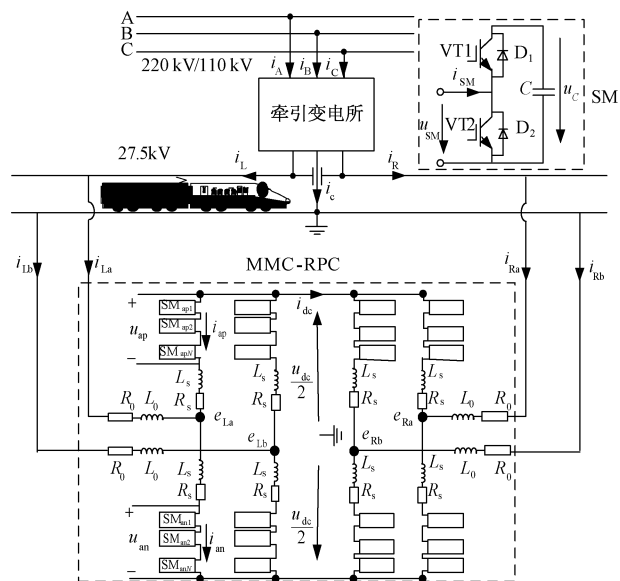


图 1 MMC-RPC 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MMC-RPC structure

图 1 中,MMC-RPC 中的两个 SPH-MMC 相互对

称,因此,只分析其中一侧的 SPH-MMC。下文中我们以 L 侧为例进行分析,L 侧每相的桥臂结构完全相同。下标 p 代表与上桥臂相关的量,下标 n 代表与下桥臂相关的量。 $i_{kp}$ 、 $i_{kn}$  表示  $k$  相上下桥臂的电流, $u_{kp}$ 、 $u_{kn}$  表示  $k$  相上下桥臂的电压, $e_{Lk}$  表示 a、b 相交流端口的节点电压, $R_0$ 、 $L_0$  表示与供电网相连线路的等效电阻、等效电感, $R_s$ 、 $L_s$  表示 SPH-MMC 桥臂的等效电阻、等效电感。

根据基尔霍夫电压定律,SPH-MMC 交流侧的数学方程为:

$$e_L = u_L - 2L_0 \frac{di_s}{dt} - 2R_0 i_s \quad (1)$$

式中, $e_L$  为 SPH-MMC 交流端口处电压, $e_L = e_{La} - e_{Lb}$ ;  $u_L$  为 L 侧牵引供电网电压, $u_L = u_{La} - u_{Lb}$ ;  $i_s$  为流入 (出)SPH-MMC 牵引供电网的电流, $i_s = i_{La} - i_{Lb}$ 。

以 L 侧 a 相为例,MMC 直流侧的电压方程为:

$$\begin{cases} \frac{u_{dc}}{2} = u_{ap} + L_s \frac{di_{ap}}{dt} + R_s i_{ap} + e_L \\ \frac{u_{dc}}{2} = u_{an} + L_s \frac{di_{an}}{dt} + R_s i_{an} - e_L \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)中上下两个桥臂直流侧的电压分别进行相加和相减,可以得到 MMC 直流侧和交流端口处的电压表达式,如式(3)所示:

$$\begin{cases} u_{dc} = (u_{ap} + u_{an}) + L_s \frac{d(i_{ap} + i_{an})}{dt} + R_s (i_{ap} + i_{an}) \\ 2e_L = (u_{ap} - u_{an}) + L_s \frac{d(i_{an} - i_{ap})}{dt} + R_s (i_{an} - i_{ap}) \end{cases} \quad (3)$$

根据基尔霍夫电流定律,可以得出 L 侧上下桥臂的电流关系,如式(4)所示:

$$\begin{cases} i_{ap} = -i_{dc}/2 - i_s, i_{an} = -i_{dc}/2 + i_s \\ i_{bp} = -i_{dc}/2 + i_s, i_{bn} = -i_{dc}/2 - i_s \end{cases} \quad (4)$$

因此,综合式(1)~式(4),可以得到 4 个桥臂子模块电压总和的关系为: $u_{ap} = u_{bn}$ ,  $u_{an} = u_{bp}$ ; 4 个桥臂电流之间的关系为: $i_{ap} = i_{bn}$ ,  $i_{an} = i_{bp}$ 。

## 3 SOGI-FLL 的测频理论及其稳定性分析

### 3.1 SOGI-FLL 的测频理论

SOGI-FLL 由传统 SOGI 和 FLL 两部分组成,其原理图如图 2 所示。其中, $S_u$  为输入信号, $S_{ul}$  为输出信号的估计值, $S_{qui}$  为构造的正交虚拟量, $\Delta u$  为误差信号, $\omega_1$  为 FLL 的输出角频率。

由图 2 可以得到 SOGI-FLL 的开环传递函数为<sup>[16]</sup>:

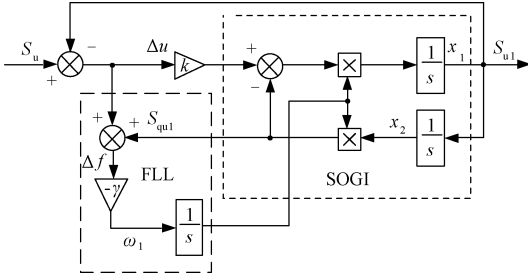


图2 新型 SOGI 的结构框图

Fig.2 Structure of new SOGI

$$\begin{cases} D(s) = \frac{S_{u1}(s)}{S_u(s)} = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + k\omega_1 s + \omega_1^2} \\ Q(s) = \frac{S_{qu1}(s)}{S_u(s)} = \frac{k\omega_1^2}{s^2 + k\omega_1 s + \omega_1^2} \\ E(s) = \frac{\Delta u(s)}{S_u(s)} = \frac{s^2 + \omega_1^2}{s^2 + k\omega_1 s + \omega_1^2} \end{cases} \quad (5)$$

$S_u$  的输入实际角频率  $\omega$  与 FLL 输出角频率  $\omega_1$  存在频率误差,为证明误差信号  $\Delta u$  与构造的正交虚拟量  $S_{qu1}$  的乘积能够有效调节频率误差  $\Delta f$ ,根据式(5)绘制出  $Q(s)$ 、 $E(s)$  的波特图,如图3所示。

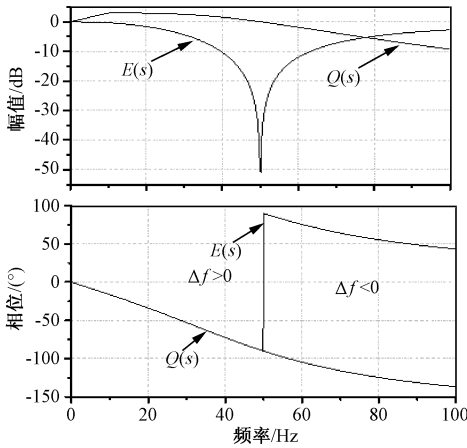


图3  $Q(s)$  和  $E(s)$  的波特图

Fig.3 Bode diagrams of  $Q(s)$  and  $E(s)$

分析波特图可知,当输入的实际角频率  $\omega$  小于 FLL 输出的角频率  $\omega_1$  时 ( $\omega < \omega_1$ ),误差信号  $\Delta u$  与输出正交虚拟量  $S_{qu1}$  同相;当输入的实际角频率  $\omega$  大于 FLL 输出的角频率  $\omega_1$  时 ( $\omega > \omega_1$ ),误差信号  $\Delta u$  与输出正交虚拟量  $S_{qu1}$  反相。由此可得,误差信号  $\Delta u$  与正交输出量  $S_{qu1}$  能够有效调节频率误差  $\Delta f$ 。当  $\omega < \omega_1$  时,  $\Delta f > 0$ ; 当  $\omega = \omega_1$  时,  $\Delta f = 0$ ; 当  $\omega > \omega_1$  时,  $\Delta f < 0$ 。因此, FLL 中具有负增益  $-\gamma$  的积分器可根据  $\Delta f$  的变化,来逐步调节  $\omega$  与  $\omega_1$  偏差,直至

$\omega = \omega_1$ 。

### 3.2 SOGI-FLL 稳定性分析

根据图2可得新型结构 SOGI-FLL 的状态空间方程为<sup>[17]</sup>:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}S_u = \begin{bmatrix} -k\omega_1 & -\omega_1^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k\omega_1 \\ 0 \end{bmatrix} S_u \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} S_{u1} \\ S_{qu1} \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \omega_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_1 = -\gamma\omega_1 x_2 (S_u - x_1) \quad (8)$$

由式(6)~式(8)可知, SOGI-FLL 是一个非线性系统,其稳定性及动态性能由输入信号的幅值和频率、SOGI 控制参数  $k$ 、FLL 控制参数  $\gamma$  共同决定。

式(8)描述了 FLL 中频率的响应特性,当系统处于稳态时,  $\Delta f = 0$ , 即  $\omega = \omega_1$ , 由此可得:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_1^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)雅克比矩阵的特征值为  $\lambda = j\omega_1$ , 由于其值为纯虚根,故系统会以  $\omega_1$  为基准值进行等幅振荡。当输入信号为  $S_u = u\sin(\omega t + \theta)$  时,其输出变量为:

$$\begin{cases} S_{u1} = u\sin(\omega t + \theta) \\ S_{qu1} = -u\cos(\omega t + \theta) \end{cases} \quad (10)$$

当 FLL 控制参数  $\gamma$  为 0, 且  $\omega \neq \omega_1$ , 但 FLL 处于稳态运行时,根据其传递函数,仍可求出输出信号如下:

$$\begin{cases} S_{u1} = u |D(j\omega)| \sin[\omega t + \theta + \angle D(j\omega)] \\ S_{qu1} = (-\omega_1/\omega)u |D(j\omega)| \cos[\omega t + \theta + \angle D(j\omega)] \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$|D(j\omega)| = \frac{k\omega\omega_1}{\sqrt{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + (k\omega\omega_1)^2}}$$
$$\angle D(j\omega) = \arctan \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{k\omega\omega_1}$$

根据式(11)可知,在 FLL 模块的控制参数为 0 时, SOGI 仍能保持输出稳定的正弦信号。在  $\omega \neq \omega_1$  时,则有:

$$\dot{\hat{x}}_1 = -\omega^2 \hat{x}_2 \quad (12)$$

式中,  $\hat{x}_1$  为 SOGI 稳定时  $x_1$  的状态变量;  $\hat{x}_2$  为 SOGI

稳定时  $x_2$  的状态量。再根据式(6)可知, 稳态同步误差信号  $\Delta u$  可表示为:

$$\Delta u = S_u - x_1 = \frac{\dot{x}_1 + \omega_1^2 x_2}{k\omega_1} \quad (13)$$

由式(12)、式(13)可知, FLL 模块中频率误差  $\Delta f$  的表达式为:

$$\Delta f = \Delta u S_{\text{qu}} = \Delta u \omega_1 x_2 = (\omega_1^2 - \omega^2) x_2^2 / k \quad (14)$$

式(14)的频率误差  $\Delta f$  能够反映频率估计的误差, 适合作为 FLL 的控制信号。当 SOGI-FLL 处于稳态时, 近似认为  $\omega = \omega_1$ , 则有  $\omega_1^2 - \omega^2 = 2\omega_1(\omega_1 - \omega)$ 。根据图 2 中 FLL 结构框图, 结合式(14), 可得 FLL 的频率响应特性为<sup>[14,16,17]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= -\gamma \Delta f = -\gamma(\omega_1^2 - \omega^2) x_2^2 / k \\ &\approx -2\gamma x_2^2 (\omega_1 - \omega) \omega_1 / k \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可知, FLL 的变化方向是以角频率误差  $\omega - \omega_1$  作为变量梯度变化的, 以  $\sigma = \omega_1 - \omega$  为误差参考信号(其中  $\omega$  为输入的系统频率, 视为常数), 则误差参考信号的一阶导数为  $\dot{\sigma} = \omega_1$ 。其相应的李亚普诺夫能量函数为:

$$V(t) = \sigma^2 > 0 \quad (16)$$

能量函数式(16)大于零, 为正定函数。进一步可得其梯度方程为:

$$\frac{d}{dx} \sigma^2 = \frac{1}{2} \sigma \dot{\sigma} = \frac{\gamma x_2^2 \sigma^2 \omega_1}{k} \leq 0 \quad (17)$$

梯度方程式(17)小于零, 为负定函数。结合式(16)、式(17), 再根据现代控制理论中的李亚普诺夫稳定性判据可得<sup>[18]</sup>, SOGI-FLL 中的 FLL 具有渐近稳定性, 当且仅当  $\omega = \omega_1$  时, 达到稳定状态。

## 4 控制器的设计

本文将新型结构 SOGI-FLL 有效地引入 MMC-RPC 双闭环控制策略中, 通过 SOGI-FLL 构造出与 MMC-RPC 中交流量正交的虚拟量。其内环控制器将产生对系统进行控制的控制量, 内环所需的电流参考指令  $i_{sd}^*$ 、 $i_{sq}^*$  则通过系统的外环控制器产生。

### 4.1 内环控制器的设计

在 SOGI-FLL 的作用下, 将构造一个与 MMC-RPC 实际交流量成正交的虚拟量。实际交流量与虚拟量共同形成  $\alpha\beta$  坐标系下的旋转矢量, 在  $\alpha\beta$  坐标系下, 式(1)被重新定义为<sup>[19]</sup>:

$$e_{\alpha\beta} = u_{\alpha\beta} - 2L_0 \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} - 2R_0 i_{\alpha\beta} \quad (18)$$

式中,  $e_{\alpha\beta}$ 、 $u_{\alpha\beta}$ 、 $i_{\alpha\beta}$  为系统中的实际交流量在  $\alpha\beta$  坐

标系下的矢量。将式(18)中的旋转矢量转化为静止矢量, 经 Park 变换可得:

$$\begin{cases} e_{sd} = u_{sd} + 2L_0 \frac{di_{sd}}{dt} - 2\omega L_0 i_{sq} + 2R_0 i_{sd} \\ e_{sq} = u_{sq} + 2L_0 \frac{di_{sq}}{dt} + 2\omega L_0 i_{sd} + 2R_0 i_{sq} \end{cases} \quad (19)$$

经 Park 变换后, PI 控制器可对电流进行误差追踪, 并成功引入输出的交流电压前反馈量, 可对输出电流的  $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  进行补偿。最终可得电压参考值:

$$\begin{cases} e_{sd}^* = u_{sd} - 2\omega L_0 i_{sq} + (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{sd}^* - i_{sd}) \\ e_{sq}^* = u_{sq} + 2\omega L_0 i_{sd} + (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{sq}^* - i_{sq}) \end{cases} \quad (20)$$

式(20)为 MMC-RPC 双闭环控制的内环控制方程, 其中, PI 控制器的比例和积分系数分别为  $k_{ip}$ 、 $k_{ii}$ ; 外环电压在旋转坐标系 d、q 轴下的参考值为  $u_{sd}^*$ 、 $u_{sq}^*$ ; 内环电流在旋转坐标系 d、q 轴下的参考值为  $i_{sd}^*$ 、 $i_{sq}^*$ 。由此可以构造出内环控制的结构框图, 如图 4 所示。

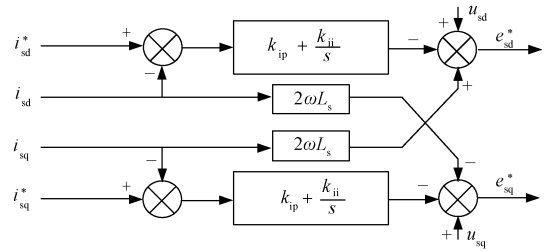


图 4 MMC 电流内环解耦控制系统

Fig. 4 Inner loop decoupling control system of MMC

### 4.2 外环控制器的设计

因为 MMC-RPC 的控制基本要求是能够准确控制传输有功功率和无功功率, 故为了得到内环电流控制器所需的  $i_{sd}^*$ 、 $i_{sq}^*$  电流参考指令, 在外环控制器中可选择使用定有功功率和定无功功率控制策略。为了给系统 MMC-RPC 提供较好的响应特性, 更好地消除稳态运行时的误差, 同样可在外环控制器中使用 PI 控制器。电流参考指令的表达式为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} i_{sd}^* = (k_{pp} + \frac{k_{pi}}{s})(P^* - p) + \frac{2P^*}{U_m} \\ i_{sq}^* = (k_{qp} + \frac{k_{qi}}{s})(Q^* - q) + \frac{2Q^*}{U_m} \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $k_{pp}$ 、 $k_{pi}$  分别为有功功率 PI 控制器的比例和积分系数;  $k_{qp}$ 、 $k_{qi}$  分别为无功功率 PI 控制器的比例和



积分系数; $P^*$ 、 $Q^*$  分别为有功功率和无功功率的参考值; $p$ 、 $q$  分别为有功功率和无功功率的实际值; $U_m$  为电压幅值。

有功和无功功率的参考值和实际值都可采用单相瞬时功率计算方法求得, $p$ 、 $q$  的表达式为<sup>[21,22]</sup>:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) \\ q = \frac{1}{2}(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) \end{cases} \quad (22)$$

综合式(21)、式(22),可构造出定有功功率和定无功功率两种外环控制器的结构框图,如图 5 所示。SOGI-FLL 运用到系统 MMC-RPC 一侧的系统控制框图如图 6 所示。

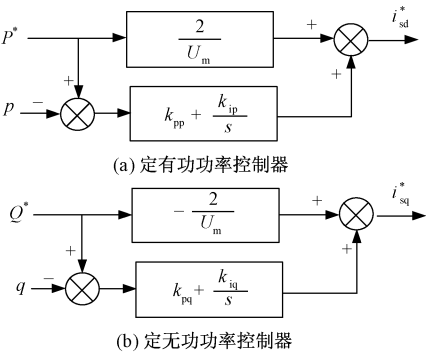


图 5 两类外环控制器

Fig. 5 Two out loop controller

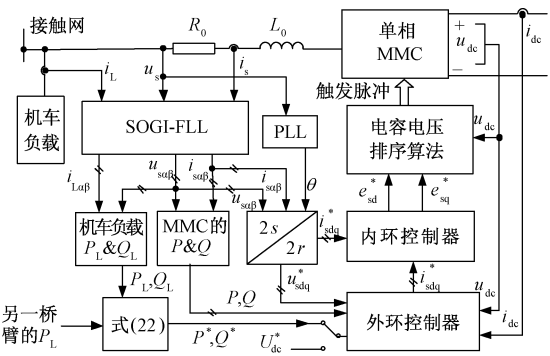


图 6 控制器结构框图

Fig. 6 Controller structure block diagram

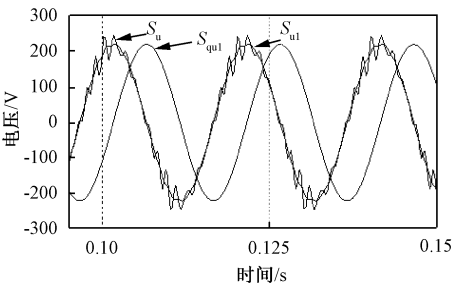
5 仿真实验

为验证 SOGI-FLL 在 MMC-RPC 中的优越性及稳定性,首先,单独检验 SOGI-FLL 在治理谐波、FLL 在锁频时具有的频率自适应性;然后,将 SOGI-FLL 运用到 MMC-RPC 中,通过 Matlab 平台进行仿真,验证其在 MMC-RPC 中抑制谐波和改善频率自适应性时的有效性和可行性。

5.1 SOGI-FLL 性能仿真分析

为验证 SOGI-FLL 在抑制谐波、提高频率自适应性时的优越性,设计对比仿真实验,输入信号  $S_u$  采用基波 50Hz/220V,并分别注入 3、5、7、9 次谐波。0~0.2s 时,其频率保持 50Hz 运行;0.2~0.5s 时,系统频率渐变至 40Hz;0.8~1s 时,系统频率逐渐恢复至 50Hz。

输入信号发生电压畸变和频率渐变时的仿真结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,当输入信号发生电压畸变时,输出信号  $S_{u1}$ 、 $S_{qu1}$  依旧为标准的正交正弦波,故 SOGI-FLL 具有有效抑制谐波的能力。由图 7(b)可知,当输入信号  $S_u$  的频率发生渐变时,FLL 的输出频率能够跟随输入信号的基波频率不断变化,这与理论分析结果一致,说明 SOGI-FLL 具有较好的频率自适应性。以上结果可以证明 SOGI-FLL 在抑制谐波、提高频率自适应性等方面具有可行性和优越性。



(a) SOGI-FLL 输入、输出信号

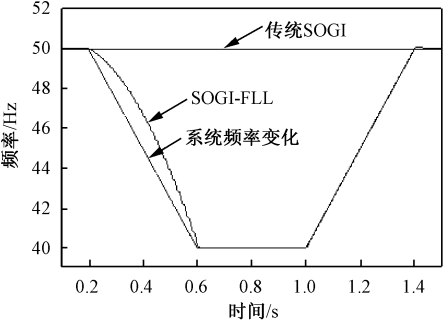


图 7 锁相波形对比

Fig. 7 Comparison of phase-locked waveforms

5.2 SOGI-FLL 在 MMC-RPC 中的仿真分析

为验证本文所述的 SOGI-FLL 在 MMC-RPC 中抑制谐波、提高频率自适应性的优越性及可靠性,在 Matlab 仿真平台中搭建 SOGI-FLL 在 MMC-RPC 中运用的仿真模型。由于 MMC-RPC 两侧对称,为节省篇幅,下文均以其中一侧作为仿真研究对象,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

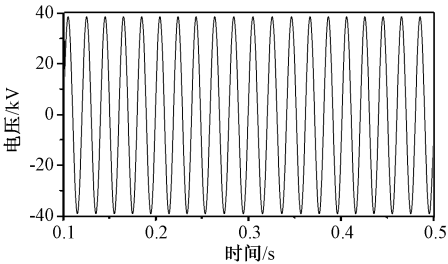
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
公共电网电压有效值 $U_m/\text{kV}$	220
系统频率 $f/\text{Hz}$	49 ~ 51
牵引供电网额定电压 $U_L, U_R/\text{kV}$	27.5
直流环节额定电压 $U_{dc}/\text{kV}$	55
交流侧电阻 $R_0/\Omega$ , 电感 $L_0/\text{mH}$	0.2, 10
上下桥臂子模块数量 $N$	20
每个子模块电容 $C/\text{F}$	0.012
上下桥臂等效电阻 $R_s/\Omega$ , 电感 $L_s/\text{mH}$	0.5, 10

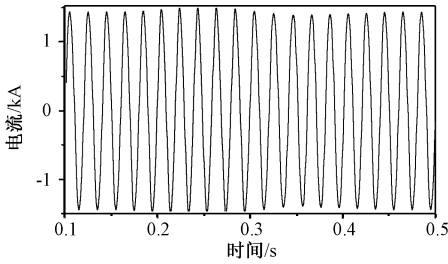
(1) 工况 1

为了验证 SOGI-FLL 在 MMC-RPC 中对系统频率变化的自适应能力,模拟系统频率发生渐变时的突发情况。0.15s 时,系统频率开始由 50Hz 逐渐增大,当系统频率在 0.25s 达到 50.4Hz 时,又开始逐步缓慢地下降,当系统频率在 0.35s 降至 49.8Hz 时,又开始缓慢回升至系统的标准频率 50Hz。

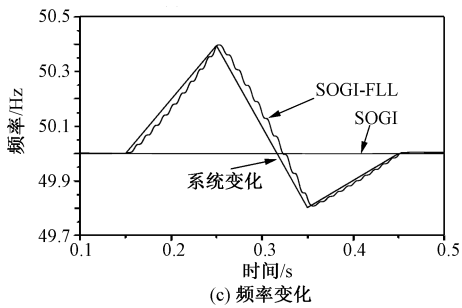
MMC-RPC 的一侧变压器电压、电流及频率的变化情况如图 8 所示。由图 8(a)和图 8(b)可知,变压器二次侧的电压、电流能够及时响应系统频率的变化,且不会引起巨大的振荡。由图 8(c)可知,当系统频率发生渐变时,SOGI-FLL 的输出频率能够跟随系统频率的变化而变化,且响应效果良好;而传统 SOGI 并不会随着系统频率的变化而发生任何变化。故 SOGI-FLL 在 MMC-RPC 中能够跟随系统频率的变化而变化,起到维持系统稳定的作用,具有频率自适应性。



(a) 一侧变压器二次电压



(b) 一侧变压器二次电流



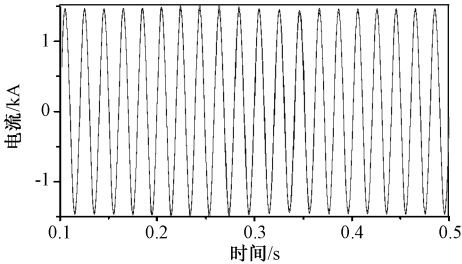
(c) 频率变化

图 8 MMC-RPC 的电压、电流及频率变化波形

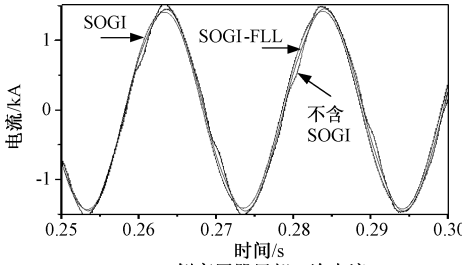
Fig. 8 Waveforms of voltage, current and frequency changes of MMC-RPC

(2) 工况 2

为对其抑制谐波的效果进行验证,假设系统频率的变化与工况 1 相同。当系统频率发生渐变时,分别对采用 SOGI、SOGI-FLL、无 SOGI 三种结构的 MMC-RPC 系统进行仿真,仿真结果如图 9 所示。由图 9(b)可以看出,运用 SOGI-FLL 结构的二次电流波形更为平缓,更接近于正弦波。



(a) 一侧变压器二次电流



(b) 一侧变压器局部二次电流

图 9 MMC-RPC 交流电流

Fig. 9 AC current of MMC-RPC

为更好说明 SOGI-FLL 在频率发生渐变时对谐波的抑制具有更优异的效果,在 0.1s、0.2s、0.3s、0.4s、0.5s 时分析三种结构下 MMC-RPC 变压器二次电流的谐波畸变率 (THD),结果如表 2 所示。

分析表 2 中数据可知,当系统处于稳定状态时,采用 SOGI-FLL 结构的 MMC-RPC 变压器二次电流的 THD 小于 1,抑制谐波性能良好;当系统频率处

表2 谐波畸变率分析

Tab.2 Total harmonic distortion analysis

	THD( % )				
	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s
无 SOGI	5.22	7.19	6.18	6.12	4.8
SOGI	1.98	4.85	5.99	3.69	1.81
SOGI-FLL	0.88	3.95	3.45	2.84	0.81

于变动时,采用 SOGI-FLL 结构对谐波的抑制效果虽不像频率稳定时那么优越,但相比于其他结构,其 THD 的值还是小一些。在系统频率发生波动及恢复至稳定的整个过程,采用 SOGI-FLL 结构时变压器二次电流的 THD 值在同一时间明显低于其他结构。因此,SOGI-FLL 结构抑制谐波的效果相比于另外两种结构更为明显,可提高牵引供电系统的电能质量。

(3) 工况 3

验证频率变化对 MMC-RPC 稳定性的影响。牵引供电系统在 0.2~0.25s 系统频率发生渐变时,系统有无 SOGI-FLL 结构对 MMC-RPC 直流端电压、电流的影响如图 10 所示。

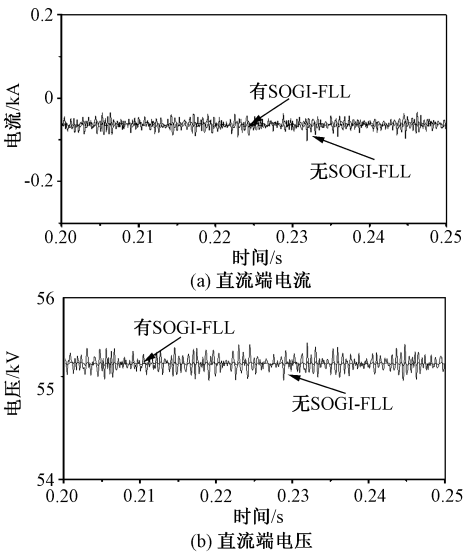


图 10 MMC-RPC 直流端电流及电压波形图  
Fig. 10 MMC-RPC DC end current and voltage waveforms

由图 10 可知,当系统频率发生渐变时,采用 SOGI-FLL 结构的 MMC-RPC 直流端电压、电流的波动影响更小,其波形图更趋于平稳。MMC-RPC 直流端的稳定,更有利于牵引供电系统的安全稳定运行,为提高 MMC-RPC 的电能质量提供了安全可靠的保障。

6 结论

针对传统二阶广义积分器频率跟踪能力差带来的牵引供电系统电能质量问题,本文将 SOGI-FLL 运用到 MMC-RPC 系统中,通过理论分析和仿真实验,可得到如下结论:

- (1)在 MMC-RPC 中采用 SOGI-FLL 能够较好地提高频率的自适应性,有利于 MMC-RPC 系统运行的可靠性,对维持系统稳定具有重大的意义。
- (2)不管是在系统频率稳定,还是系统频率发生波动时,采用 SOGI-FLL 结构都具有良好的抑制谐波能力,能更好地提高牵引供电系统的电能质量。

参考文献 (References):

[ 1 ] 欧阳森, 梁伟斌 (Ouyang Sen, Liang Weibin). 基于 PSCAD/EMTDC 的电气化铁路接入电网的电能质量评估方法 (An evaluation method of power quality about electrified railways connected to power grid based on PSCAD/EMTDC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 52-58.

[ 2 ] 刘乾勇, 李欣然, 肖聪, 等 (Liu Qianrong, Li Xinran, Xiao Cong, et al.). 牵引负荷负序电流对电网运行状况影响研究 (Research of impact of traction load negative sequence current on grid operating status) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (4): 7-10.

[ 3 ] 罗培, 陈跃辉, 罗隆福, 等 (Luo Pei, Chen Yuehui, Luo Longfu, et al.). 铁路电能质量控制系统容量优化设计 (Railway power quality manage system capacity optimization design) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (8): 181-188.

[ 4 ] 方璐, 罗安, 徐先勇, 等 (Fang Lu, Luo An, Xu Xianrong, et al.). 高速电气化铁路新型电能质量补偿系统 (A novel power quality compensator for high-speed electric railway) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2010, 25 (12): 167-176.

[ 5 ] 陈柏超, 张晨萌, 袁傲, 等 (Chen Baichao, Zhang Chenmeng, Yuan Ao, et al.). 基于 V/V 牵引供电系统的混合式电能质量补偿研究 (Resaerch on a hybrid compensation system for V/V high-speed railway power supply system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (12): 60-69.

- [6] 宋平岗, 林家通, 李云丰, 等 (Song Pinggang, Lin Jiatong, Li Yunfeng, et al.). 采用 MMC-RPC 治理牵引供电系统负序和谐波的 PIR 控制策略 (PIR control strategy on compensation of negative sequence and harmonic for railway power supply system using MMC-RPC) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (12): 108-116.
- [7] 宋平岗, 周振邦, 董辉 (Song Pinggang, Zhou Zhenbang, Dong Hui). 采用虚拟惯性的 MMC-RPC 功率同步控制策略 (The power synchronization control strategy with virtual inertial of MMC-RPC) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (12): 4014-4021.
- [8] Joseph Vineetha P, Thomas Jaimol. Power quality improvement of AC railway traction using railway static power conditioner a comparative study [A]. International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON) [C]. 2014. 1-6.
- [9] Joseph V P, Thomas J. A fuzzy controller based railway static power conditioner for AC traction [A]. 2013 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems [C]. 2013. 1-7.
- [10] 王卫安, 桂卫华 (Wang Wei'an, Gui Weihua). 两相牵引供电系统电能质量有源综合治理技术研究 (Comprehensive active power quality compensation technology for two phase traction power supply system) [J]. 铁道学报 (Journal of The China Railway Society), 2013, 35 (9): 31-38.
- [11] Jain C, Singh B. A SOGI-FLL based control algorithm for single phase grid interfaced multifunctional SPV under non ideal distribution system [A]. 2014 Annual IEEE India Conference (INDICON) [C]. 2014. 1-6.
- [12] 谢聪, 吴新开, 雷雅云 (Xie Cong, Wu Xinkai, Lei Yayun). 基于双二阶广义积分锁相的风电并网系统仿真 (Simulation of grid-connected wind power system based on double second-order generalized integral phase lock) [J]. 电气传动自动化 (Electric Drive Automation), 2015, 37 (2): 1-5.
- [13] 辛振, 赵仁德, 陈晨, 等 (Xin Zhen, Zhao Rende, Chen Chen, et al.). 基于双二阶广义积分器-锁频环的异步电机同步角频率估计方法 (New induction motor synchronous angular frequency estimation method based on dual second order generalized integrator-frequency locked loop) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (27): 4676-4682.
- [14] David Gamez Patiño, Edison Geovanny Guamá Erira, Edison Escobar Rosero, et al. SOGI-FLL for synchronization and fault detection in an inverter connected to the grid [A]. 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM) [C]. 2015. 833-838.
- [15] Jin-Wook K, Seung-Wook H, Seok-Jin H, et al. Advanced control method of 3-phase AC/DC PWM converter for DC distribution using the SOGI-FLL [A]. 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia) [C]. 2016. 2120-2124.
- [16] Yi Hao, Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede, et al. Impedance analysis of SOGI-FLL-based grid synchronization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (10): 7409-7413.
- [17] Tuan Ngo, Quan Nguyen, Surya Santoso. Improving performance of single-phase SOGI-FLL under DC-offset voltage condition [A]. IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. 2014. 1537-1541.
- [18] 于长官 (Yu Changguan). 现代控制理论 (Modern control theory) [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社 (Harbin: Harbin Institute of Technology Press), 2009.
- [19] 宋平岗, 林家通, 李云丰, 等 (Song Pinggang, Lin Jiatong, Li Yunfeng, et al.). 基于模块化多电平铁路功率调节器直接功率控制策略 (Direct power control strategy of railway static power conditioner based on modular multilevel converter) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (9): 2511-2518.
- [20] 宋平岗, 林家通, 李云丰, 等 (Song Pinggang, Lin Jiatong, Li Yunfeng, et al.). 基于模块化多电平换流器的牵引供电负序治理 (Novel droop control strategy of MMC-RPC combined with power coupled and resistance ratio) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2015, 13 (6): 18-27.
- [21] 宋平岗, 周振邦, 董辉 (Song Pinggang, Zhou Zhenbang, Dong Hui). 一种新型的 MMC-RPC 功率控制策略 (A novel power control strategy for MMC-RPC) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2018, 38 (1): 52-58.
- [22] 宋平岗, 吴继珍, 邹欢, 等 (Song Pinggang, Wu Jizhen, Zou Huan, et al.). 模块化多电平换流器功率平坦控制策略 (Power flatness control strategy for modular multilevel converter) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (2): 563-570.



## Design of MMC-RPC controller based on SOGI-FLL

SONG Ping-gang, GONG Jia-kang, ZHOU Zhen-bang

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

**Abstract:** The traction power supply system has the problems of the power quality, such as poor frequency adaptive performance and harmonics. On the basis of the traditional integrator (Second Order Generalized Integrator, SOGI), combined with the frequency locked loop (FLL) a new SOGI-FLL structure is proposed in this paper. This structure is used in the modular multilevel converter railway static power conditioner (MMC-RPC), which is one of modular multilevel converter structure. It can improve the tracking ability of the system frequency, speed up the response, effectively control harmonics, and improve power quality. The MMC-RPC simulation system model based on SOGI-FLL is built in Matlab, and the simulation results and theoretical analysis prove the feasibility and effectiveness of the SOGI-FLL application in MMC-RPC system.

**Key words:** modular multilevel converter; railway static power conditioner; second order generalized integrator; frequency locked loop