

基于模块化多电平换流器的虚拟同步机设计

李文启¹, 徐 箭², 刘韶林¹, 高东学¹, 饶宇飞³, 兰天楷², 喻 宙²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 为应对大量新能源并网给电力系统惯量、频率所带来的不利影响, 提出了一种基于模块化多电平换流器的虚拟同步机, 并研究了其控制技术。该虚拟同步机使用一种能提供虚拟惯量的 d 轴外环控制器代替传统MMC的外环功率控制器, 从而为电力系统提供暂态频率支撑。同时, 采用了一种基于两相静止坐标的锁相环, 代替常用的同步坐标锁相环, 以更好地适应虚拟同步控制对参考相位的要求。基于实时数字仿真器的仿真结果表明, 该虚拟同步机能模拟出同步机的惯性和调速器特性, 其并网运行可以减少系统的暂态有功缺额, 降低频率偏差, 阻尼区域间振荡。

关键词: 虚拟同步机; 模块化多电平换流器; 阻尼; 实时数字仿真器

Design of virtual synchronous generator based on modular multilevel converter

LI Wenqi¹, Xu Jian², LIU Shaolin¹, GAO Dongxue¹, RAO Yufei³, LAN Tiankai², YU Zhou²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Henan

Electric Power company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to deal with the negative influence of large amount of new energy on the inertia and frequency of power system, a virtual synchronous genertor based on modular multilevel converter is proposed and its control technology is studied. The virtual synchronous genertor uses a d -axis external ring controller which can provide virtual inertia instead of the traditional MMC external ring power controller to provide transient frequency support for power system. At the same time, a phase locked loop based on two-phase static coordinates is adopted to replace the common synchronous coordinate locked loop to better meet the requirements of virtual synchronous control for reference phase. The simulation results based on the real-time digital simulator show that the virtual synchronous machine can simulate the inertia and governor characteristics of the synchronous genertor, and its grid-connected operation can reduce the transient active power shortage, reduce the frequency deviation, and damp the oscillation between regions.

Key words: virtual synchronous genertor; modular multilevel converter; damping; real-time digital simulator

0 引言

现代电力系统中新能源所占的发电比重逐渐变大, 这给系统的惯量、频率稳定性带来了不良影响^[1-2]。为解决这一问题, 学者们提出并

发展了虚拟同步机技术^[3]。

本质上说, 虚拟同步机是一种新的电力电子设备控制方式, 它可以使电力电子设备具有传统同步机的功频特性与阻尼特性, 参与系统

国网河南省电力公司科技项目资助 (虚拟同步发电机技术在多点布局电池储能系统中的应用研究)

的调频和振荡过程。研究表明,虚拟同步机的投入可以在一定程度上改善电力系统的暂态和动态特性^[4]。

当前有许多文献针对虚拟同步机进行了研究。其中,文献[5]提出了一种VSG控制策略,并在不同的电网条件下进行测试,结果表明VSG可以较好地模拟传统同步机的部分特性。文献[6]将VSG技术应用于多端直流输电系统中,以实现风电并网。其并网换流器能够体现出同步机的部分特性,并阻尼交流电网的振荡。文献[7-8]将直流侧电容电压的动态引入虚拟同步控制,分别用于两端直流输电和多端直流输电,减小了短路比对换流器运行的不利影响。文献[9]剖析了控制参数对VSG外特性的影响,为其参数配置提供了理论依据。文献[10]将虚拟同步技术应用于微电网中的光伏逆变器,改善了微电网的并网运行特性,并提升了其孤网运行能力。

但上述文献在一些方面仍存在不足。它们主要针对系统中已有的电力电子元件,使用虚拟同步控制替代其原来的控制,从而改善设备的动态特性,但没有考虑新型虚拟同步设备在现代电力系统中的新应用。且这些研究主要针对两电平电压源换流器(VSC),尚未有应用于模块化多电平换流器(MMC)的虚拟同步机控制技术。

本文结合储能技术和电力电子技术的发展现状,提出了一种基于MMC的虚拟同步机(MMC-VSG)及其控制策略。MMC-VSG使用虚拟同步控制替代传统MMC控制器的外环功率控制,并使用了一种基于两相静止坐标系($\alpha\beta$ 坐标系)的锁相环代替常用的同步(dq)坐标锁相环(Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop, SRFPLL),以适应VSG区别于常规电力电子设备的同步特性。在电网没有受到扰动时,MMC-VSG不与电网交换有功功率;当电网频率发生波动时,则体现出同步机的调频特性与功角摇摆特性,起到辅助调频、平抑振荡的作用。基于实时数字仿真器(RTDS)的仿真测试验证了MMC-VSG的上述

特性。

1 模块化多电平换流器及其控制技术

模块化多电平换流器是2002年由Marquardt和Lesnicar提出的一种换流器的拓扑结构^[11]。与传统的两电平VSC相比,MMC具有制造难度低、换流损耗低和波形质量高等优点。MMC的结构如图1所示^[12]。图1中,左侧的表示交流三相并网点瞬时电势, O' 点为交流中性点,右侧的 O 点为直流零电位参考点。参考点和交流并网点间连接的元件即三相换流桥。换流桥共有6个桥臂,每个桥臂均由一个桥臂电抗器和 N 个子模块串联形成。桥臂电抗器在图1中用 R_0 、 L_0 标出,子模块则用SM标注,角标为子模块编号。

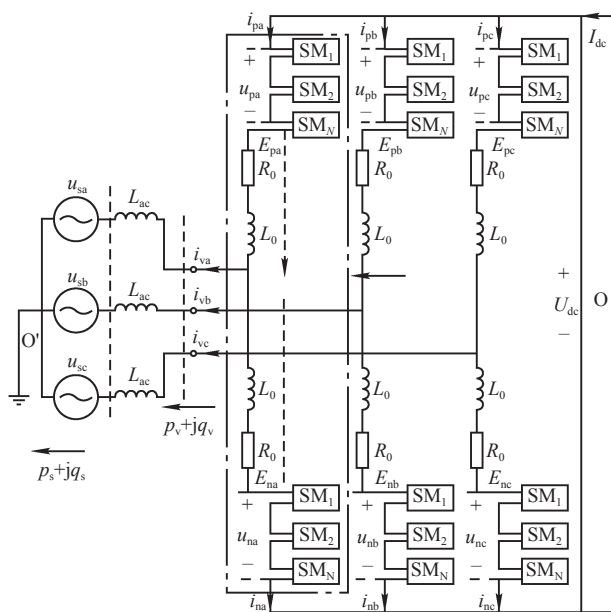


图1 MMC的拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of MMC

控制器通过改变每个子模块的工作状态,在交流侧生成阶梯波电势,用以逼近交流系统的正弦波电压,完成调制过程,如图2所示。

典型的MMC控制器结构框图如图3所示。控制器通过实测的电压、电流计算出交流功率,与功率指令值作比较,经过外环功率控制器,形成内环电流指令 i_{vd}^* , i_{vq}^* 。该电流指令再和交流电流实测值作比较,生成 dq 坐标系下

上、下桥臂的差模电压 u_{diffdq}^* 及共模电压 i_{comdq}^* 。最后,这两个电压通过开环控制,生成MMC触发脉冲,完成阶梯波调制。图3中, T 为坐标变换; θ 为锁相环输出相角; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量;其他变量含义较为明显,且与虚拟同步控制关系不大,可参考文献[12],此处不再赘述。

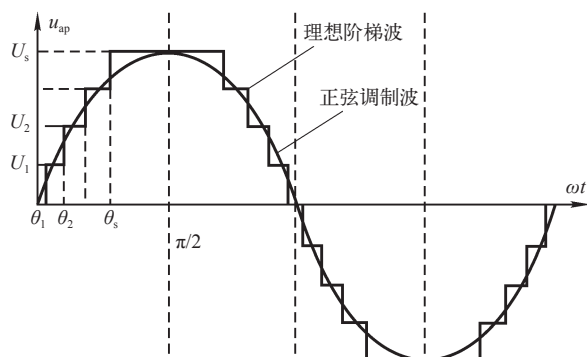


图2 阶梯波调制

Fig. 2 Step wave modulation

2 虚拟同步机的设计原理

如第1节中所述的模块化多电平换流器及其控制技术,可按需要实现交、直流侧的定功率或定电压控制,灵活快速地完成交、直流能量交换。但在电网受到扰动时,这类设备不会对系统状态的变化作出响应,因而对电网的安全稳定作出的贡献有限。

同步发电机对电力系统的安全稳定起到举足轻重的作用,而虚拟同步机技术则是指使用某些控制方式,使电力电子变流器体现出同

步发电机机电特性的技术。应用了该技术的电力电子设备,能够体现出同步机并网运行的惯性、阻尼、有功调频和无功调压等优良特性^[3],增强电网的抗扰动能力。

本文所提出的虚拟同步机技术保留了电力电子设备在无功控制方面的快速性和灵活性,而将同步机在有功-频率特性中体现出的惯性移植到MMC上,使其能够参与电力系统调频和暂态过程。在考虑同步机的惯性和频率响应时,一般使用其经典二阶模型。该模型可表示为^[13]

$$u_d = X'_d i_q - r_a i_d \quad (1)$$

$$u_q = E'_q - X'_d i_d - r_a i_q \quad (2)$$

$$J_m \omega \frac{d\omega}{dt} = P_e - P_m \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

式中, u_d 、 u_q 为 dq 坐标系下的同步机端电压; i_d 、 i_q 为定子电流; E'_q 为内电势; r_a 、 X'_d 分别为定子电阻和暂态电抗; J_m 为转子惯量; θ 为转子角; ω 为转子转速; P_e 、 P_m 分别为电磁功率和机械功率。

结合第1节所述的MMC的拓扑结构与典型控制方式,本文在构建基于MMC的虚拟同步机时,将桥臂电抗器 R_0 、 L_0 视为同步发电机的定子阻抗 r_a 、 X'_d ;将其交流侧电流 i_{vd} 、 i_{vq} 视作同步机定子电流 i_d 、 i_q 。通过控制MMC的交流电流(对应同步机定子电流),模拟同步机的机电特性,以实现虚拟同步机的功能。

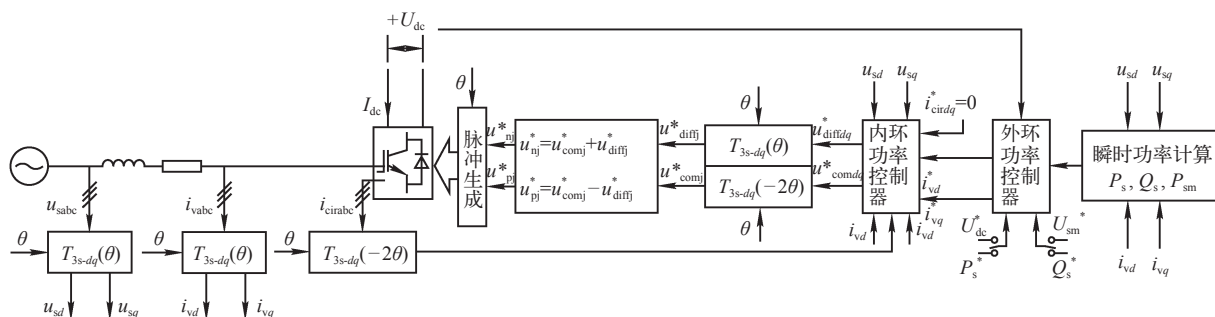


图3 典型的MMC控制框图

Fig. 3. Typical MMC control block diagram

3 基于MMC的虚拟同步机设计

MMC换流器和电网的有功交换主要由 d 轴电流决定,同时还受到 q 轴电流的耦合作用^[12]。因此,本文的虚拟同步机控制根据式(1)~式(4)所描述的同步机有功特性,首先通过频率反馈确定MMC的 d 轴电流,然后使用前馈控制补偿 q 轴电流对有功的耦合,以满足虚拟同步机的外特性需要。由于虚拟同步机对参考相位的要求不同于传统的电压源换流器,本文还设计了一种基于两相静止坐标系的锁相环,为虚拟同步机提供参考相位。

3.1 外环虚拟惯量控制

由同步机的二阶模型(1)~(4)可知,同步机的惯量通过式(3)体现到电力系统中。为使MMC的有功输出模拟同步机特性,产生虚拟惯量,设计 d 轴电流外环控制器如图4所示。

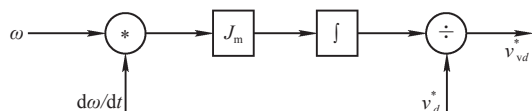


图4 实现虚拟惯量的 d 轴电流外环控制器

Fig. 4 d -axis current outer ring controller with virtual inertia

当系统的频率变化率为0时,虚拟同步机不向系统注入 d 轴电流,相应地,其有功功率为0。当系统受到扰动时,频率发生变化,虚拟同步机能够响应这种变化,及时改变 d 轴电流注入量,使用自己的虚拟惯量辅助电网调频。其体现出的虚拟惯量值可以通过参数 J_m 来整定。虚拟同步机的 q 轴电流可以根据需要,模拟同步发电机的励磁特性,也可沿用MMC的控制逻辑,进行定无功或定交流电压控制。本文为了更好地分析虚拟同步机在有功-频率方面的特性,并摒除其他控制对此产生的影响,采取了定 q 轴电流控制,并将 q 轴电流指令值设为0。

3.2 内环电流控制

如第1节所述,MMC的交流电流是通过阶梯波调制,在并网节点生成相应的三相正弦电压来控制的。考虑到桥臂电抗器 R_0 、 L_0 的作用, d 、 q 轴的电压、电流之间会相互耦合。因

而,在通过外环电流控制器得到电流指令后,本文还使用了相应的内环电流控制器,并补偿 d 、 q 轴的耦合项,得到差模电压指令值,为阶梯波调制提供参考。内环电流控制器的结构如图5所示。

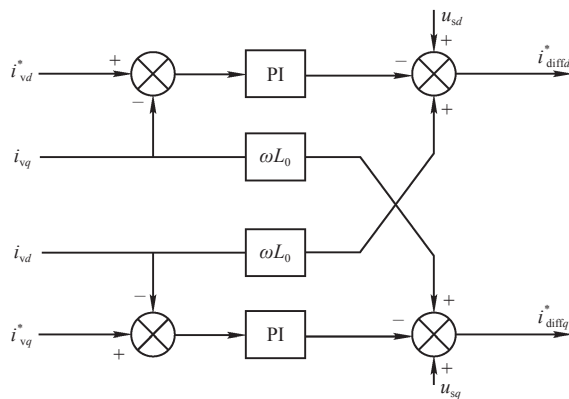


图5 内环电流控制器

Fig. 5 Inner loop current controller

3.3 锁相环的设计

为实现MMC的虚拟同步控制,电力电子设备需要能响应系统的频率变化率(ROCOF),即图4中的 $d\omega/dt$ 。大多数电力电子设备的锁相环均采用SRFPLL。SRFPLL在检测到频率偏差时,会迅速改变自身的输出相角,以实现迅速精准地锁相。在应用于传统电力电子设备时,SRFPLL的快速跟踪特性非常有利于设备的有功、无功控制。但在应用于虚拟同步机时,SRFPLL暂态过程的快速性可能产生很大的ROCOF,导致虚拟同步机过度地响应频率变化。为解决这一问题,本文为MMC-VSG设计了一种基于两相静止坐标($\alpha\beta$ 坐标)的锁相环,其锁相方式如图6所示。

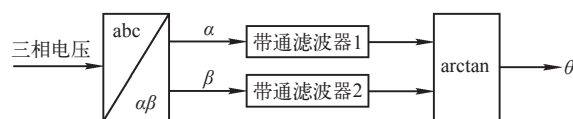


图6 基于两相静止坐标系的锁相环

Fig. 6 Phase-locked loop based on two-phase static coordinate system

该锁相环以测量得到的电网三相电压作为输入,对其进行 $\alpha\beta$ 变换。所得的 α 、 β 轴电压分量分别通过一个以电网额定频率为中心频率的

带通滤波器，再使用反正切函数 ($\arctan$) 得到参考相角。由于带通滤波器的作用，该锁相环的输出不会迅速且精确地跟踪电网频率，而是在一个通频带内随电网频率的变化而摇摆。锁相环的性能可以通过调整带通滤波器的品质因数来改变。

除了内、外环电流控制器及锁相环之外，基于MMC的虚拟同步机还包含用于实现共模电流抑制、生成触发脉冲等功能的控制器。这些控制器的设计和传统MMC换流器比较类似，此处不再赘述。

4 仿真算例

本节使用实时数字仿真器 (RTDS) 进行仿真，在理想系统中测试MMC-VSG并网运行所体现的外特性，验证了稳定系统频率的功能，并在改进的四机两区系统中验证了MMC-VSG对区域间振荡的阻尼作用。

4.1 外特性测试

在RTDS中所搭建的MMC-VSG外特性测试模型如图7所示。其中包括等值交流系统 (A部分)、受控负载 (B部分) 和虚拟同步机 (C部分)。等值交流系统的机电特性采用了文献[13]中的数据，其额定容量为 $555 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ，惯性时间常数 $H=3.5 \text{ MW} \cdot \text{s}/\text{MV} \cdot \text{A}$ 。为适应我国电力系统的实际情况，系统的额定频率被修改为 50 Hz 。算例中通过受控负载的投入和切出模拟等值交流系统受到的扰动，进而测试虚拟同步机的响应特性。

用作扰动的受控负荷在约 $t=0.2 \text{ s}$ 时投入，持续 1 s 后切出。在系统未接入MMC-VSG的情况下，当负荷投入时，交流系统为该负荷额外提供的功率如图8a所示。受此影响，系统的频率下降情况如图8b所示，ROCOF如图8c所示。

如果系统接入了虚拟同步机，那么等值交流系统和虚拟同步机的响应如图9所示。

由图9a可知，虚拟同步机分担了本应由等值交流系统提供的有功功率，因而能减少系统

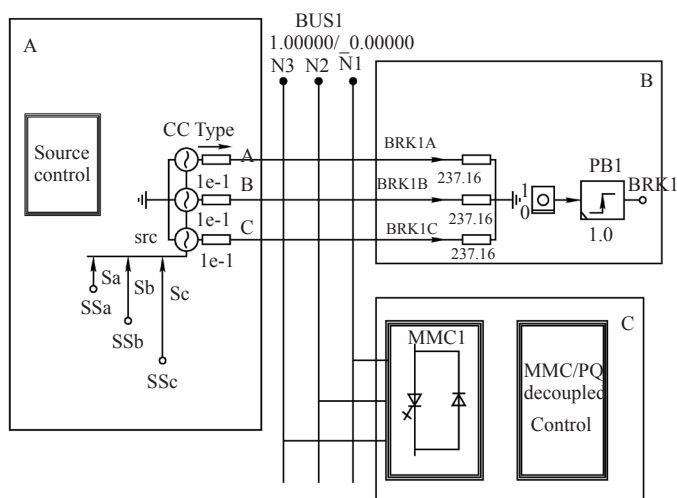


图7 RTDS中搭建的测试系统

Fig. 7 Test system built in RTDS

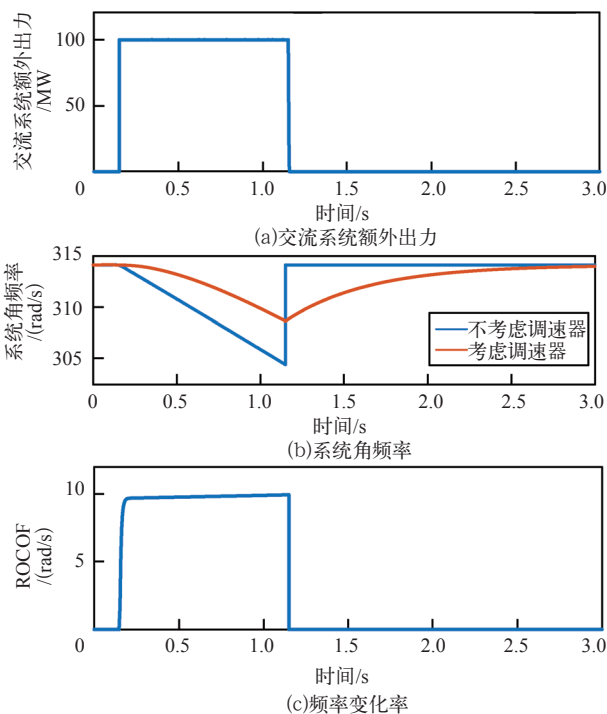


图8 无虚拟同步机时的系统特性

Fig. 8 System characteristics without virtual synchronizer

的频率偏差。对比图9b、图8b，可知虚拟同步机为系统带来了类似调速器的响应特性（绿色方框A中的部分）。此外，无论是否考虑交流系统调速器，虚拟同步机都能减少系统的最大频率偏差（绿色方框B中的部分）。对比图9c、图8c，虚拟同步机还降低了系统的ROCOF，并起到稳定系统频率的作用。

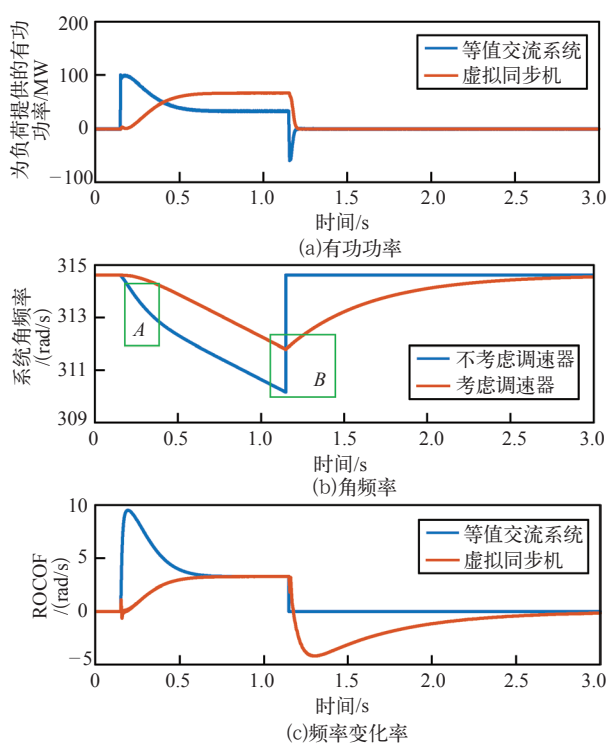


图9 接入虚拟同步机后的系统特性
Fig. 9 System characteristics with virtual synchronizer

4.2 四机两区系统测试

为了进一步验证MMC-VSG在实际电力系统中的作用,本文在改进的四机两区系统中进行了测试。整个系统的结构如图10所示^[13]。本文将右侧系统的两个同步机替换为双馈风机,并调整了系统潮流,使右侧系统通过母线7和母线9间的联络线向左侧系统输送功率,以模拟大规模新能源并网的场景。

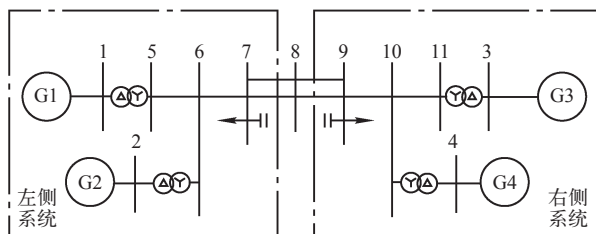


图10 改进的四机两区系统
Fig. 10 Improved four-machine two-zone system

由于右侧系统中的所有电源都是新能源,因而惯性很小,9号节点上的负荷功率波动将全部由联络线承担。当该负荷突增至100 MW时,联络线上的功率波动和线路两端功角差分别如

图11a、图11b所示。负荷功率波动引起了一定的区域间振荡。

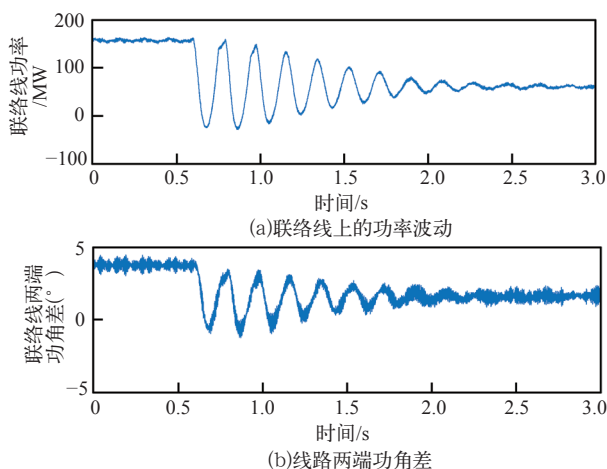


图11 没有MMC-VSG时的系统动态

Fig. 11 System dynamics without MMC-VSG

为补偿右侧系统的惯量,减小区域间振荡,在母线9处并联一个MMC-VSG。此时,系统对负荷变化的响应如图12所示。MMC-VSG起到了明显的阻尼作用。

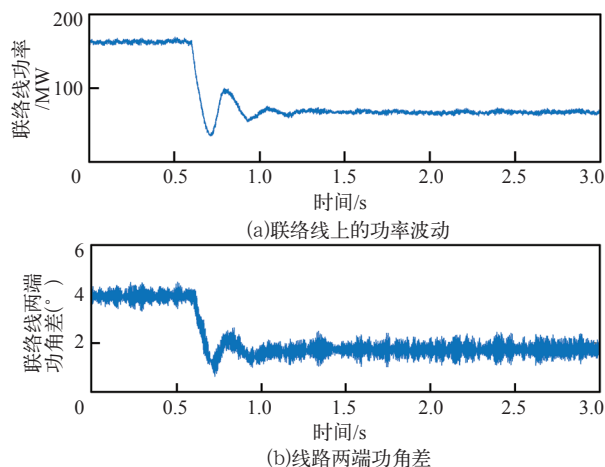


图12 有MMC-VSG并网运行时的系统动态

Fig. 12 System dynamics with MMC-VSG

5 结束语

本文提出了一种基于模块化多电平换流器的虚拟同步机。该虚拟同步机能够模拟常规同步发电机的转子惯量和调速器特性。在并网运行后,其能够利用自身的虚拟惯量来增强系统的总惯量,在暂态过程中减小系统的有功缺额,降低频率偏差和区域间振荡,起到提升电

力系统稳定性的作用。基于RTDS的电磁暂态仿真验证了MMC-VSG的上述功能。

和常规的模块化多电平换流器相比,该设备使用虚拟惯量控制代替了外环功率控制,并使用基于静止坐标系的锁相技术代替常规的同步坐标锁相环,从而体现出了同步发电机的部分外特性。

本文算例显示,在单机-无穷大系统中,虚拟同步机的投入能减小系统的频率下降速度,将频率的最小值提升了约1 rad/s。在改进的四机两区系统中,在负荷波动的情况下,虚拟同步机的投入极大地减小了区域间振荡的次数和持续时间。投入虚拟同步机后,区域间振荡的次数由约9次减少到了1次,振荡时间由约2 s缩短到了不到0.5 s。

在接下来的工作中,将进一步考虑同步机励磁和无功功率间的关系,研究能更好模拟同步机特性的虚拟同步机技术。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-412.
- [3] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.
- [4] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-349.
- [5] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [6] CAO Y, WANG W, LI Y, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 33(2): 750-761.
- [7] HUANG L, XIN H, WANG Z, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [8] HUANG L, XIN H, YANG H, et al. Interconnecting very weak AC systems by multi-terminal VSC-HVDC links with a unified virtual synchronous control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1041-1053.
- [9] 陈俊马, 王冰, 张德望. 虚拟同步发电机参数整定及优化控制策略研究[J]. 电气应用, 2018, 37(10): 78-84.
- [10] 陈毛欣, 李岚. 基于虚拟同步发电机的储能型光伏逆变技术[J]. 电气应用, 2015, 34(16): 51-54.
- [11] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high voltage-modular multilevel converter[C]. 2004 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004: 502-507.
- [12] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [13] 昆德. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [14] TONG L, ZOU X, FENG S S, et al. An SRF-PLL-based sensorless vector control using the predictive deadbeat algorithm for the direct-driven permanent magnet synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 2837-2849.

作者简介



李文启

李文启(1963—),男,教授级高工,主要研究方向为电网运行分析控制、电网安全风险防控和新能源消纳等。

(收稿日期:2018-11-07) **EA**