第 51 卷 第 4 期：1609-1618 高电压技术 Vol.51, No.4: 1609-1618
2025 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232251

开绕组同步电机接口并网变流器功率控制及暂态支撑

马志豪[1]，孙　丹[1]，刘　纯[2]，毕家瑞[1]
（1. 浙江大学电气工程学院，杭州 310058;
2. 可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京 100192）

摘　要：随着高比例新能源电力系统的发展，系统等效转动惯量大幅下降，电网发生故障时，系统频率稳定问题愈发凸显。针对该问题，提出了一种以开绕组电励磁同步电动机(open-winding wound field synchronous motor, OW-WFSM)为接口的并网变流器供电系统。在建立 OW-WFSM 数学模型的基础上，分析了系统功率、电压电流矢量关系，由此设计了基于相位差闭环控制的变流器矢量控制策略以及 OW-WFSM 励磁系统无功-电压协调控制策略，实现了变流器与 OW-WFSM 的功率解耦控制与稳定传输，并利用 Lyapunov 稳定性定理对控制原理进行了分析验证。通过对系统暂态频率支撑能力的分析，证明了所提拓扑中 OW-WFSM 仍具备惯量响应能力。同时，采用电机转子位置定向的变流器能够自然增发有功，实现了电网惯性和有功支撑能力的进一步提升。仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词：开绕组同步电动机；新能源；并网接口；惯量响应；暂态频率支撑

Power Control and Transient Support of Grid-connected Converter Based on OW-WFSM Interface

MA Zhihao[1], SUN Dan[1], LIU Chun[2], BI Jiarui[1]
(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems(China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: With the development of high percentage of renewable energy power system, the equivalent rotational inertia of the system has decreased significantly, and the problem of system frequency stabilization is becoming more pronounced when grid faults occur. To address this problem, this paper proposes a grid-connected converter power supply system with open-winding wound field synchronous motor (OW-WFSM) as the interface. Based on the establishment of the mathematical model of OW-WFSM, the system power and voltage-current vector relations are analyzed. The converter power transfer control strategy with phase difference closed-loop control and the reactive power-voltage coordinated control strategy of the OW-WFSM excitation system are designed to realize the decoupled control and stable transmission of the converter and the OW-WFSM power. The control principle is analyzed and verified by using the Lyapunov stability theorem. By analyzing the transient frequency support capability, it is proved that the OW-WFSM in the proposed topology still has the inertia response capability. Meanwhile, the converter with motor rotor position orientation is able to naturally increase the active power, which realizes the further improvement of grid inertia and active power support capability. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: open-wound synchronous motor; new energy; grid-connected interface; inertia response; transient frequency support

0　引言

随着新能源发电量占比的逐步提高，电力系统高比例新能源和高比例电力电子设备的关键特征更加显著。然而，由于电力电子变流器不具备旋转元件，无法为系统提供传统的同步惯量支撑，进而会给系统的频率稳定造成极大威胁[1-2]。因此，在构建新型电力系统的大环境下[3]，研究如何赋予新能源电力电子变流器惯性、提升新能源供电的可靠性具有重要意义。

目前的解决思路主要有 2 类。一是通过改进控制方法使新能源具备电网同步电压构建能力。目前研究最为广泛的是转子动能控制，不仅能充分利用

基金资助项目：国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-202155293A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5100-202155293A-0-0-00).

“隐藏”的旋转动能且无需额外安装设备[4]。转子动能控制主要分为虚拟同步机控制(virtual synchronous generater，VSG)[5-7]与虚拟惯量控制[8-9] 2 类。其中，VSG 通过在变流器外环控制中模拟同步电机转子运动方程来进行有功-频率调节，使变流器具备惯量响应、频率调节能力。但由于线路电抗在同步频率点处失去对电流的抑制能力，因此 VSG 会存在同步频率谐振现象[10]，易引发功率震荡，导致系统不稳定。此外，该类方法并未从根本上改变电力电子变流器的接口及其控制特性，无法完全模拟同步发电机瞬时磁链的暂态响应特性。

第 2 类解决思路是通过并网拓扑的重构增强新能源变流器暂态支撑能力。国家电网公司于 2018 年提出适用于新能源场站的新型分布式调相机项目，在提升跨区输电能力和支撑新能源消纳方面发挥了重要作用[11-12]。但调相机转动惯量通常不足常规发电机组的 1/2，且配套容量只有新能源场站的 20%~25%，所能提供的等效转动惯量不足。为解决惯量不足的问题，澳大利亚电力调度利用高惯量调相机以确保互联线跳闸的情况下各区域能保持足够的惯性[13]。但目前调相机整体成本较高，且不具备有功输出能力，在电网末端大规模配置存在暂态功角失稳的潜在问题[14]。文献[15-16]提出了一种新能源驱动同步电动机-同步发电机并网的方案，光伏等新能源机组发电经汇聚后驱动同步电动机，同步电动机再通过机械轴同步发电机发电；但其发电侧为 100%新能源发电驱动相同容量的电动机，孤岛系统的稳态和暂态稳定运行难度大，工程应用难。文献[17-18]提出了一种采用风电机组经电磁耦合调速驱动同步发电机直接并网的方案，可有效改善风电机组的暂态过载、故障穿越和电网电压支撑能力，但风机改装难度及成本较大。文献[19]提出了由新能源变流器与开绕组永磁同步发电机串联组合成供电拓扑，但考虑原动机多采用汽轮机，调速过程可能存在滞后和误差，系统存在较大失步风险；同时永磁体励磁不可调节，无功输出调节难度大。文献[20]针对该拓扑的孤岛运行模式进行了研究，但逆变器侧仅输出无功功率以实现负载侧交流电压调节，可再生能源输出有功的能力被忽略。考虑上述并网拓扑改造方式的局限性，文献[21]提出了一种新型电力电子并网装置，将开绕组电励磁同步电动机(open-winding wound field synchronous motor，OW-WFSM)作为并网接口串联在变流器与电网之间，替代原有滤波器。暂态下由耗能投退装置隔离变流器，再对电机进行强励，为电网提供无功支撑。该方案相比于变流器与开绕组发电机串联的拓扑，电机运行状态由发电转变为电动，简化了系统构成，提升了电机响应速度，但并未提供完善的并网逆变器控制策略。

本文针对开绕组电励磁同步电机接口的新能源并网变流器新拓扑，基于 OW-WFSM 的数学建模，分析变流器、OW-WFSM、电网三端口的功率流。提出基于相位差闭环的变流器矢量控制策略，并结合 OW-WFSM 励磁电压双闭环控制，以实现并网点功率的实时跟踪、维持电机同步运行，进而为系统提供稳定的惯量支撑；励磁控制通过对 OW-WFSM 无功功率的调控以保证变流器容量的最大化利用。进一步对暂态下 OW-WFSM 的惯量响应和相位差闭环控制时延进行分析，以验证所提系统具备有效的暂态频率支撑能力。最后通过仿真验证本文所提拓扑和控制策略的可行性和有效性。

1 系统基本运行原理与建模

1.1 OW-WFSM 接口并网系统拓扑结构

OW-WFSM 接口并网系统拓扑结构如图 1 所示。其中，Ⅰ为变流器，直流侧接光伏或储能，实现新能源直交变换；Ⅲ为 OW-WFSM，定子绕组 3 端子接变流器，另外 3 端子接电网，电机不带负载运行在电动机状态；Ⅱ为 Crowbar 装置。在电网故障条件下，通过 Crowbar 装置的投入，隔离变流器，通过强励使 OW-WFSM 转变为调相机模式运行，为电网提供强大的无功支撑，具有与同步调相机相同的短路电流水平和暂态过电压抑制能力。图 1 中，U_{dc} 为变流器直流侧电压；E_{ga}、E_{gb}、E_{gc} 分别为电网三相电压；I_{ga}、I_{gb}、I_{gc} 分别为电网三相电流。

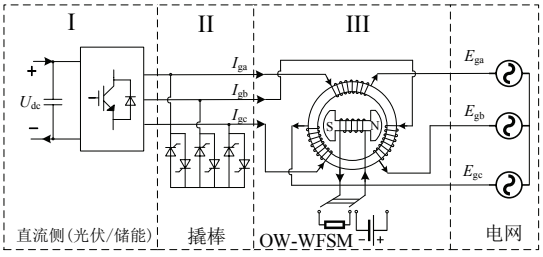


图 1 开绕组同步电机接口并网系统拓扑

Fig.1 Grid-connected topology based on OW synchronous motor interface

与常规新能源并网系统拓扑相比，图 1 拓扑中增加的 OW-WFSM 可使并网变流器在暂态下具备同步机特性，包括惯量响应，从而改善电网的低惯量问题。OW-WFSM 可配置在新能源的机端临近点，即区域电网的最末端，具有分布式特点，配置灵活，电压等级低。此外，电机绕组阻抗也可作为变流器输出端口的滤波器，从而节省一定成本。但引入开绕组电机的同时，系统的拓扑复杂度和运行损耗也将略有增加。

由于图 1 中 OW-WFSM 一侧串接新能源变流器，另一侧直接与电网连接，而电网侧电压不可控，需要通过对单一变流器的控制来同时实现同步电机的稳定运行及新能源发电功率的稳定传输。因此，需要对图 1 所示系统拓扑中的电机、电网、变流器各物理量的耦合关系进行矢量分析、定义及建模，从而为控制策略的设计提供理论支撑。

1.2　开绕组同步电机建模

与常规电机相比，开绕组电机无需改变原有的电磁设计与机械结构，仅将其定子绕组中性点打开而呈现出双端口开放式绕组。

OW-WFSM 在 dq 坐标系下的磁链分量为：

$$\begin{bmatrix}\psi_{sd}\\ \psi_{sq}\\ \psi_{\mathrm{f}}\\ \psi_{\mathrm{D}d}\\ \psi_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_d & 0 & L_{\mathrm{a}d} & L_{\mathrm{a}d} & 0\\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{\mathrm{a}q}\\ L_{\mathrm{a}d} & 0 & L_{\mathrm{f}} & L_{\mathrm{a}d} & 0\\ L_{\mathrm{a}d} & 0 & L_{\mathrm{a}d} & L_{\mathrm{D}d} & 0\\ 0 & L_{\mathrm{a}q} & 0 & 0 & L_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{\mathrm{f}}\\ i_{\mathrm{D}d}\\ i_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中：ψ_{sd}、ψ_{sq} 为定子绕组 dq 轴磁链；ψ_{f} 为励磁磁链；$\psi_{\mathrm{D}d}$、$\psi_{\mathrm{D}q}$ 为阻尼绕组 dq 轴磁链；i_{sd}、i_{sq} 为定子绕组 dq 轴电流；i_{f} 为励磁电流；$i_{\mathrm{D}d}$、$i_{\mathrm{D}q}$ 为阻尼绕组 dq 轴感应电流；$L_{\mathrm{a}d}$、$L_{\mathrm{a}q}$ 为 dq 轴电枢反应电感；L_d、L_q 为 dq 轴同步电感；L_{f} 为转子励磁绕组自感；$L_{\mathrm{D}d}$、$L_{\mathrm{D}q}$ 为阻尼绕组 dq 轴自感。各电感之间的关系式为：

$$\begin{cases}L_d=L_{\mathrm{a}d}+L_{\mathrm{sl}}\\ L_q=L_{\mathrm{a}q}+L_{\mathrm{sl}}\\ L_{\mathrm{f}}=L_{\mathrm{a}d}+L_{\mathrm{fl}}\\ L_{\mathrm{D}d}=L_{\mathrm{a}d}+L_{\mathrm{D}d\mathrm{l}}\\ L_{\mathrm{D}q}=L_{\mathrm{a}q}+L_{\mathrm{D}q\mathrm{l}}\end{cases}\tag{2}$$

式中：L_{sl} 与 L_{fl} 分别为定子绕组及转子励磁绕组漏感；$L_{\mathrm{D}d\mathrm{l}}$ 与 $L_{\mathrm{D}q\mathrm{l}}$ 为阻尼绕组 dq 轴漏感。

OW-WFSM 在 dq 坐标系下的定子电压分量可以表示为：

$$\begin{bmatrix}u_{sd}\\ u_{sq}\\ u_{\mathrm{f}}\\ u_{\mathrm{D}d}\\ u_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_{\mathrm{s}} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & R_{\mathrm{s}} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & R_{\mathrm{f}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & R_{\mathrm{D}d} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{\mathrm{f}}\\ i_{\mathrm{D}d}\\ i_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}+p\begin{bmatrix}\psi_{sd}\\ \psi_{sq}\\ \psi_{\mathrm{f}}\\ \psi_{\mathrm{D}d}\\ \psi_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}+\omega_{\mathrm{r}}\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\psi_{sd}\\ \psi_{sq}\\ \psi_{\mathrm{f}}\\ \psi_{\mathrm{D}d}\\ \psi_{\mathrm{D}q}\end{bmatrix}\tag{3}$$

式中：u_{sd}、u_{sq} 为定子绕组 dq 轴电压；u_{f} 为励磁电压；$u_{\mathrm{D}d}$、$u_{\mathrm{D}q}$ 为阻尼绕组 dq 轴电压；R_{s} 为定子电阻；R_{f} 为励磁绕组电阻；$R_{\mathrm{D}d}$、$R_{\mathrm{D}q}$ 为阻尼绕组 dq 轴电阻；ω_{r} 为电机转子电角速度；p 为微分算子。

dq 坐标系下的电磁转矩方程可以表示为：

$$\begin{aligned}T_{\mathrm{e}}&=1.5n_{\mathrm{p}}(\psi_{sd}i_{sq}-\psi_{sq}i_{sd})=\\ &\quad 1.5n_{\mathrm{p}}(L_{\mathrm{a}d}i_{\mathrm{f}}i_{sq}+(L_d-L_q)i_{sd}i_{sq})\end{aligned}\tag{4}$$

式中：n_{p} 为电机极对数，由于本文中电机空载运行，电磁转矩仅用以克服摩擦力，数值上可忽略不计。

OW-WFSG 的转子运动方程为：

$$J_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}=n_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}\right)-D_{\mathrm{m}}(\omega_{\mathrm{r}}-\omega_{\mathrm{r}0})\tag{5}$$

式中：J_{m} 为电机转动惯量；$\omega_{\mathrm{r}0}$ 为与电网同频的转子电角速度；T_{m} 为原动机转矩；T_{e} 为电磁转矩；D_{m} 为电机阻尼系数。

2　功率传输控制

2.1　系统矢量关系与运行机理分析

图 1 拓扑中 OW-WFSM 运行于空载状态，忽略轴上摩擦、转轴惯量等因素，电机轴上输出的有功功率近似为 0。当沿电机转子磁场方向定向时，OW-WFSM 的 q 轴电流即为 0。

当 OW-WFSM 与电网共用 dq 轴定向系统时，系统电压电流矢量关系如图 2 所示，其中 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}$ 和 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{vsc}}$ 和 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{g}}$ 分别为 OW-WFSM 端电压、逆变器交流侧电压和电网电压；θ_{r} 为 OW-WFSM 转子位置电角度；$\boldsymbol{i}_{\mathrm{m}d}$ 为 OW-WFSM 直轴电流；$\boldsymbol{\Phi}$ 为 OW-WFSM 励磁磁通。后文中不加粗字母为图 2 中对应字母的标量形式。图 2(a)、(b)分别对应 OW-WFSM 处于欠励和过励状态，由于增磁控制会降低电机的转速上限，通常会设置给定 d 轴电流≤0，因此，本文选择图 2(a)的情况进行分析。

由于电机的转速控制已占用了 q 轴电流的控制

自由度，变流器产生的有功功率只能由 d 轴电流进行控制，即 $\boldsymbol{i}_{md}\neq 0$。而电网电压与 $\boldsymbol{i}_{md}$ 的方向一致，电机和电网才能共用 dq 轴定向系统，此时无需再对电网电压进行重新定向，同时新能源所产生的功率完全作为有功功率传送至电网。但由于 q 轴既是电机的有功功率分量方向，又是电网的无功功率分量方向，电机空载运行已限制 OW-WFSM 交轴电流 $\boldsymbol{i}_{mq}$ 为 0，导致新能源变流器无法向电网传递无功功率，这在电网短路等故障情况下是极为不利的。

为解决上述问题，本文提出 OW-WFSM 与电网 dq 轴独立定向的控制方法。对于电机系统建立 i_{md} 和 i_{mq} 的电流 dq 轴定向系统，而对于电网则建立 i_{gd} 和 i_{gq} 的电流 dq 轴定向系统。对应的电压电流矢量关系如图 3 所示。图 3 中，θ_g 为电网电压矢量角；θ 为电机转子位置角与电网电压相角之差；$\boldsymbol{E}_m$ 为 OW-WFSM 内电势；$\boldsymbol{i}_{gd}$、$\boldsymbol{i}_{gq}$ 分别为电网电流 d、q 轴分量；$\boldsymbol{i}_f$ 为 OW-WFSM 励磁电流；X_d 为 OW-WFSM 直轴电抗。由于 OW-WFSM 与电网串联，因此流过 OW-WFSM 的电流矢量与流入电网的电流矢量相同，均为 $\boldsymbol{i}_s$。

由图 3 可知，若变流器同时具备有功与无功输出能力，则 OW-WFSM 定子端电压矢量与电网电压矢量处于非正交状态。将 $\boldsymbol{i}_{md}$ 沿电网电压 $\boldsymbol{E}_g$ 和垂直于电网电压 $\boldsymbol{E}_g$ 的方向分解，得到电网的有功电流分量 $\boldsymbol{i}_{gd}$ 和无功电流分量 $\boldsymbol{i}_{gq}$。后文中不加粗字母为图 3 中对应字母的标量形式。

根据电网调度的有功无功指令及电网电压，可以得到电网的有功电流分量和无功电流分量的给定值为：

$$\begin{cases} i_{gd}=i_{md}\cos(\pi-\theta)=-i_{md}\cos\theta=\dfrac{P_e^*}{\sqrt{3/2}E_g} \\ i_{gq}=i_{md}\sin(\pi-\theta)=i_{md}\sin\theta=\dfrac{Q_e^*}{\sqrt{3/2}E_g} \end{cases} \tag{6}$$

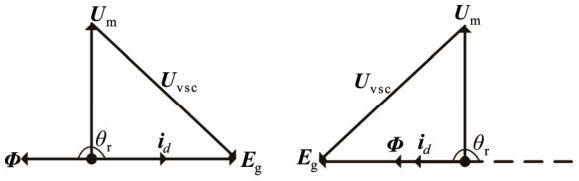
式中：P_e^* 为输入电网的有功功率；Q_e^* 为输入电网的无功功率。

进而可以得到电机无功电流 i_{md} 的给定值为：

$$i_{md}^*=-\frac{\sqrt{\left(P_e^*\right)^2+\left(Q_e^*\right)^2}}{\sqrt{3/2}E_g} \tag{7}$$

电机无功电流可通过电机转子位置角与电网电压角之间的相角差 θ 进行控制，即：

$$\theta^*=\arctan\left(-\frac{Q_e^*}{P_e^*}\right)+\pi \tag{8}$$



(a) OW-WFSM欠励 (b) OW-WFSM过励

图 2 系统矢量图(dq 轴共用)

Fig.2 System vector diagram (common dq-axis)

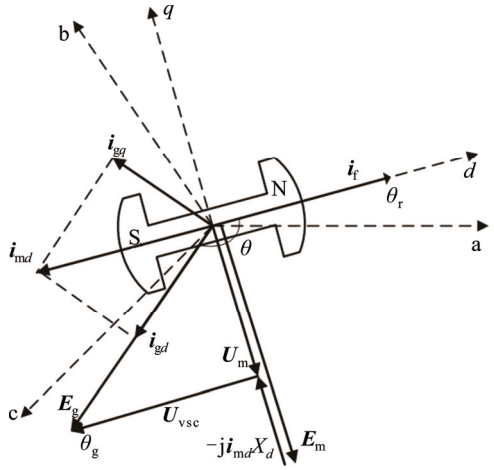


图 3 系统矢量图(dq 轴独立)

Fig.3 System vector diagram (independent dq-axis)

此外，为确保系统功率因数不过低，避免变流器容量损失以及供电系统电压损失和线路损耗增加，本文通过励磁控制对 OW-WFSM 无功功率进行调节，来实现变流器仅输出有功、OW-WFSM 进行无功补偿的控制效果，以有效发挥同步机的无功输出能力，实现变流器容量的充分利用。

由图 3 可知，OW-WFSM 端电压可以表示为：

$$U_m=E_0-\omega_r i_{md}L_{sd}=\omega_r i_f L_{md}-\omega_r i_{md}L_{sd} \tag{9}$$

若要实现变流器仅输出有功、OW-WFSM 进行无功补偿的控制目标，变流器端电压需满足：

$$U_m=E_g\cos(\theta-\frac{\pi}{2}) \tag{10}$$

由此可得，所需励磁电流为：

$$i_f^*=\frac{\omega_r i_{md}L_{sd}-E_g\cos\theta^*}{\omega_r L_{md}} \tag{11}$$

基于上述功率指令与 dq 轴电流、相位差之间的关系，便可对变流器并网控制策略进行分析与设计。

2.2 变流器并网控制策略

并网变流器一种常规控制方式为 PQ 控制，是一种电流源型控制，其本质是并网点功率的控制，如图 4 所示。由于 OW-WFSM 的引入，PQ 控制无

法在控制并网点功率的同时，对电机状态进行控制。因此，需要对被控对象进行转换，本文以OW-WFSM作为变流器控制对象，间接实现并网点功率的控制。

同时，与常规双变流器控制的OW-WFSM系统相比[22-23]，由于本文拓扑中OW-WFSM一侧连电网，控制器数量只有1个，需对单个变流器进行控制并对电网电压进行补偿。在控制目标方面有所增加，需要对有功、无功功率指令计算得到的电机转子位置角与电网电压角之间的相角差θ^*进行精准控制。但相角差θ^*与电机转速ω_r之间的关系未知，因此，本文采用Lyapunov稳定性定理对相角差θ^*与电机转速ω_r间的控制律进行分析。

OW-WFSM转子位置角与电网电压相位可表示为：

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{r}}=\int\omega_{\mathrm{r}}\mathrm{d}t\\ \theta_{\mathrm{g}}=\int\omega_{\mathrm{g}}\mathrm{d}t\end{cases}\tag{12}$$

式中：ω_g为电网电压角速度。

由此可得电机转子位置角与电网电压角之间的相角差为：

$$\theta=\theta_{\mathrm{r}}-\theta_{\mathrm{g}}=\int(\omega_{\mathrm{r}}-\omega_{\mathrm{g}})\mathrm{d}t\tag{13}$$

则电机电角速度可以表示为：

$$\omega_{\mathrm{r}}=\frac{\mathrm{d}(\theta_{\mathrm{r}}-\theta_{\mathrm{g}})}{\mathrm{d}t}+\omega_{\mathrm{g}}\tag{14}$$

选取Lyapunov函数为：

$$V=\frac{1}{2}(\theta-\theta^*)^2\tag{15}$$

则其沿误差系统动态方程$\mathrm{d}(\theta-\theta^*)/\mathrm{d}t$的时间导数为：

$$V'=(\theta-\theta^*)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\theta-\theta^*)\tag{16}$$

式中：θ^*为常数，其导数为0。代入式(14)可知：

$$V'=(\theta-\theta^*)(\omega_{\mathrm{r}}-\omega_{\mathrm{g}})\tag{17}$$

为使V'负定，可令：

$$\omega_{\mathrm{r}}-\omega_{\mathrm{g}}=-P(\theta-\theta^*)\Rightarrow\omega_{\mathrm{r}}=-P(\theta-\theta^*)+\omega_{\mathrm{g}}\tag{18}$$

式中：P为比例系数。

由于ω_g未知，需构造一个自适应控制器，修改上面得到的电机转速表达式，即：

$$\omega_{\mathrm{r}}=-P(\theta-\theta^*)+\hat{\omega}_{\mathrm{g}}\tag{19}$$

式中：$\hat{\omega}_{\mathrm{g}}$是扩张状态，用于抵消系统中未知的$\omega_g$。为了得到能够达成此目的的$\hat{\omega}_{\mathrm{g}}$表达式，需再次使用Lyapunov稳定性定理：

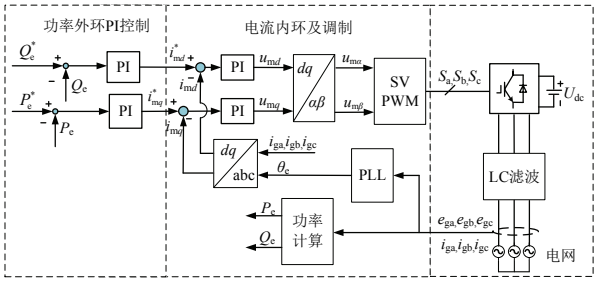


图4　变流器PQ控制

Fig.4　PQ control of the converter

$$V=\frac{1}{2}(\theta-\theta^*)^2+\frac{1}{2I}e^2\tag{20}$$

式中：I为积分系数；e为角速度估计误差。

其导数为：

$$\begin{aligned}V'&=(\theta-\theta^*)(\omega_{\mathrm{r}}-\omega_{\mathrm{g}})+\frac{e}{I}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}=\\&(\theta-\theta^*)(-P(\theta-\theta^*)+\hat{\omega_{\mathrm{g}}}-\omega_{\mathrm{g}})+\frac{e}{I}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}-\\&P(\theta-\theta^*)^2+(\theta-\theta^*)(\hat{\omega_{\mathrm{g}}}-\omega_{\mathrm{g}})+\frac{e}{I}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}=\\&-P(\theta-\theta^*)^2\end{aligned}\tag{21}$$

末式的导出需施加如下约束：

$$(\theta-\theta^*)(\hat{\omega}_{\mathrm{g}}-\omega_{\mathrm{g}})+\frac{e}{I}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}=0\tag{22}$$

如果该约束成立，则V'负定，意味着相角差控制误差θ–θ^*会收敛至0。为了使该约束成立，定义角速度估计误差为：

$$e=\hat{\omega_{\mathrm{g}}}-\omega_{\mathrm{g}}\tag{23}$$

由此可得：

$$\begin{aligned}&(\theta-\theta^*)(\hat{\omega_{\mathrm{g}}}-\omega_{\mathrm{g}})+\frac{e}{I}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}=0\Rightarrow\\&\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}=-I(\theta-\theta^*)\Rightarrow\frac{\mathrm{d}\hat{\omega_{\mathrm{g}}}}{\mathrm{d}t}=-I(\theta-\theta^*)\Rightarrow\\&\hat{\omega_{\mathrm{g}}}=\int-I(\theta-\theta^*)\mathrm{d}t\end{aligned}\tag{24}$$

结合式(19)、(24)可得：

$$\omega_{\mathrm{r}}=-P(\theta-\theta^*)+\int-I(\theta-\theta^*)\mathrm{d}t\tag{25}$$

由此可知，相角差θ^*与电机转速ω_r符合PI控制律。因此，可采用PI控制器，通过控制电机转速间接实现对相角差θ的准确控制。

基于上述分析，本文提出基于源网相位差定向的变流器同步控制策略，控制框图如图5所示，整体为相位环、速度环、电流环的三闭环结构。其中，相位环用以调节相角差恒定，相角差误差经PI调节器输出给定转速ω_r；转速环用以控制电机转速维持

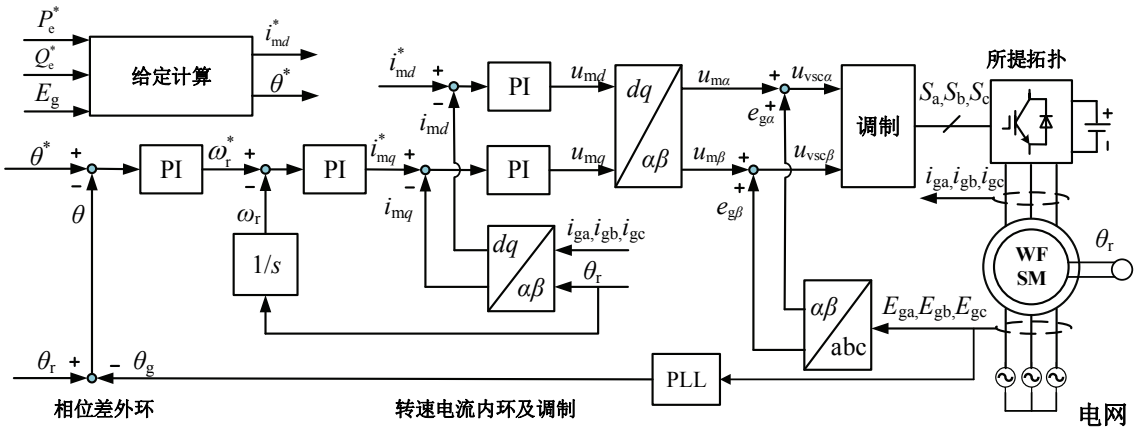


图 5 基于相位差定向 OW-WFSM 接口并网系统控制框图

Fig.5 Control block diagram of grid-connected system based on phase-difference oriented OW-WFSM interface

同步速，转速误差经 PI 调节器输出给定有功功率电流 i_{mq}；电流环用以维持有功功率电流 i_{mq} 近似为 0，电机的无功功率电流 i_{md} 跟随给定。

2.3 OW-WFSM 励磁控制策略

对于 OW-WFSM 的励磁控制目标，从无功功率角度出发，是要实现无功和电压的协调控制，稳态时以无功控制为目标，满足系统对无功功率的需求；暂态时以稳定电压为目标，在发生电压跌落等短时故障时，快速强励，起到稳定机端电网电压的效果。

为了实现系统稳态时的无功控制和暂态时的电压控制，提出一种 OW-WFSM 励磁系统无功-电压协调控制策略。该策略以无功外环-电流内环的双闭环控制方式进行调节，同时无功环附加机端电压偏差反馈，实现对 OW-WFSM 无功-电压的协调控制。控制框图如图 6 所示，图中 K_B 为移相增益系数；θ_f 为晶闸管触发角度余弦值；Q_m 为 OW-WFSM 输出无功功率。

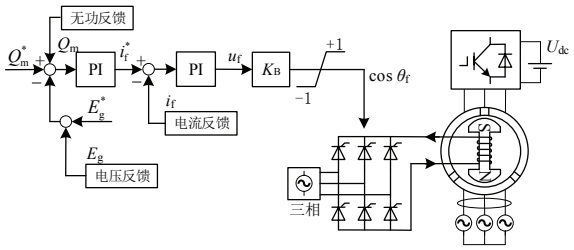


图 6 OW-WFSM 励磁系统无功-电压协调控制控制框图

Fig.6 OW-WFSM excitation system reactive power-voltage coordinated control block diagram

3 系统暂态频率支撑分析

前文所提变流器与 OW-WFSM 励磁配合的功率传输控制策略，可确保新能源变流器与 OW-WFSM 功率的稳定传输与控制。但当前电网频率稳定问题较为突出，要求新能源并网设备具备一定的频率支撑能力。本文所研究的以 OW-WFSM 为接口的并网逆变器供电系统在暂态下的频率支撑能力主要来源于以下 2 点：(1)OW-WFSM 惯量响应；(2)相位差闭环控制时延。

3.1 OW-WFSM 惯量响应

当负荷突变或电网故障产生功率缺额时，在不平衡功率的作用下，OW-WFSM 会经历惯性响应阶段，该阶段可由转子运动方程描述为：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{d}t}=\omega_{r0}(\omega_r-1)\\ \dfrac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t}=\dfrac{n_p^2}{J_m\omega_r}(P_m-P_e)-\dfrac{D_m(\omega_r-\omega_{r0})}{J_m}\end{cases}\tag{26}$$

式中：P_m 为 OW-WFSM 机械功率；P_e 为 OW-WFSM 输入电网的电磁功率。由于电机轴上无负载，P_m 用以克服摩擦力，数值上可忽略。

式(26)结合系统功率突变过程分析可知，负荷有功突增会引起 OW-WFSM 电磁功率突增，转子转速降低，转子电角度减小。由于阻尼作用，OW-WFSM 转速不会持续降低，而是达到一个新的平衡点，即：

$$\omega_{r1}=\omega_{r0}-\frac{n_p^2}{D_m\omega_{r1}}\Delta P_e\tag{27}$$

式中：ΔP_e 为电磁功率变化量；ω_{r1} 为平衡时刻角速度。

在系统频率发生变化时，OW-WFSM 转子速度基本同步变化，在此过程中，转子动能也在相应发

生变化，假设施加到转子上的机械功率保持不变，则转子动能的变化量将以 OW-WFSM 电磁功率的形式注入到电网中，此功率即为惯量支撑。

对于大电网在严重功率缺额事故中的频率动态特性，惯量支撑功能的作用并不明显，而一次调频功能的作用却较为明显，惯量支撑作用的主要目的是为一次调频赢得时间。

3.2　相位差闭环控制时延

电网可近似视作由同步机构成的电压源，因此，当发生负荷突变或电网故障产生功率缺额时，电网频率将如式(28)所示变化。

$$\begin{aligned} &T_{\mathrm{J}}\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}+T_{\mathrm{D}}(\omega_{\mathrm{g}}-\omega_{\mathrm{g}}^{*})=-\Delta P_{\mathrm{L}}\Rightarrow \\ &\omega_{\mathrm{g}}=\omega_{\mathrm{g}}^{*}-\frac{\Delta P_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{D}}}+\frac{T_{\mathrm{J}}}{T_{\mathrm{D}}}\mathrm{e}^{-\frac{T_{\mathrm{D}}}{T_{\mathrm{J}}}(t+C_1)} \end{aligned} \tag{28}$$

式中：ΔP_{L} 为负载有功变化量；T_{J} 为惯性时间常数；T_{D} 为阻尼时间常数；ω_{g}^{*} 为电网电压角速度参考值；C_1 为常数，取决于初始条件。

本文所提拓扑中的 OW-WFSM 转速受相位及转速闭环控制，即：

$$\frac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}=\omega_{\mathrm{r}}=K_{\mathrm{p}}(\theta^{*}-\theta)+K_{\mathrm{i}}\int(\theta^{*}-\theta)\mathrm{d}t \tag{29}$$

式中：K_{p} 为相位差环比例系数；K_{i} 为相位差环积分系数。其中，在负荷有功突变后的极短时间内，与比例项相比，积分项数值较小，可忽略不计。由此，结合式(12)、(28)可得：

$$\begin{aligned} &\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}\approx K_{\mathrm{p}}((\omega_{\mathrm{r}}^{*}-\omega_{\mathrm{r}})-(\omega_{\mathrm{g}}^{*}-\omega_{\mathrm{g}}))=K_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{g}}-\omega_{\mathrm{r}})\Rightarrow \\ &\omega_{\mathrm{r}}=\omega_{\mathrm{g}}+\frac{1}{K_{\mathrm{p}}}\mathrm{e}^{-K_{\mathrm{p}}(t+C_2)} \end{aligned} \tag{30}$$

式中：ω_{r}^{*} 为电机转子角速度参考值；C_2 为常数，取值取决于初始条件。由此可知，负荷有功突变至电网频率稳定的时段内，电机转速 1 会略高于电网频率，差值随时间减小，直至 2 者完全同频，示意图如图 7 所示。图中，t_0 为负荷突变初始时刻，t_1 为负荷功率平衡时刻。

图 7 中阴影部分为 $\Delta\theta$，即相位差的稳态增量。此时，式(8)转化为：

$$\theta^{*}+\Delta\theta=\arctan\left(-\frac{Q_{\mathrm{e}}'}{P_{\mathrm{e}}'}\right)+\pi \tag{31}$$

对式(8)、(31)作差可得：

$$\Delta\theta=\arctan\left(\frac{Q_{\mathrm{e}}^{*}}{P_{\mathrm{e}}^{*}}\right)-\arctan\left(\frac{Q_{\mathrm{e}}'}{P_{\mathrm{e}}'}\right)>0\Rightarrow P_{\mathrm{e}}'>P_{\mathrm{e}}^{*} \tag{32}$$

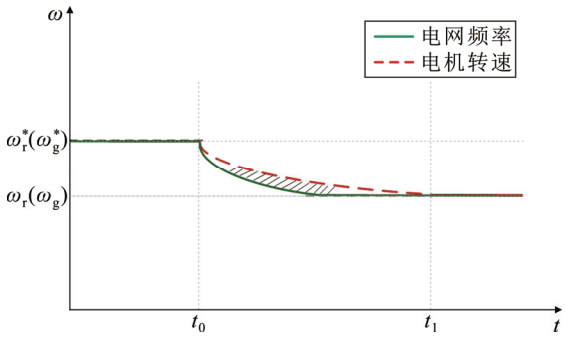


图 7　功率缺额工况下电机与电网频率变化示意图

Fig.7　Schematic diagram of motor and grid frequency change under power deficit condition

式中：P_{e}'、Q_{e}' 为考虑相位差闭环控制时延的输入电网功率。

由此可知，由于相位差闭环控制时延，会对电机转速产生一种阻尼效果，由此产生的相位差增量将会增大并网点有功功率，从而起到主动频率支撑的效果。

4　仿真与分析

为了验证所提拓扑和基于源网相位差定向的功率传输策略的有效性，本节基于 MATLAB/Simulink 对所提方法在多个工况下进行了仿真研究。为了验证所提方法的优越性，进一步将不含同步机接口的传统变流器矢量控制方法(策略Ⅰ，控制结构如图 4 所示)、虚拟同步控制方法[5-6](策略Ⅱ)与基于本文所提同步机接口的变流器源网相位差定向矢量控制方法(策略Ⅲ)进行对比实验。仿真中采用直流稳压源对变流器直流侧可再生能源进行简化。为了更真实地模拟电网特性，仿真中采用同步发电机替代理想三相电压源对电网进行模拟。仿真系统中的参数设置如表 1 所示。

4.1　OW-WFSM 同步速运行

设定初始时刻输入电网有功功率为 450 kW，无功功率为 200 kvar。其中，变流器负责提供有功功率，OW-WFSM 通过励磁提供无功功率。在 30 s 时，输入电网的功率指令变化为 P_{e}=100 kW、Q_{e}=100 kvar，变流器与 OW-WFSM 相应调整自身输出满足功率指令要求。仿真结果如图 8—11 所示。

图 8、9 分别为电网端口、变流器端口和 OW-WFSM 端口的有功、无功功率曲线，其中 P_{I}、Q_{I} 分别为变流器输出有功功率和无功功率。各端口有功、无功功率均按照给定指令进行输送，稳态误

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	750
开关频率 f_{pwm}/kHz	10
定子绕组电阻 R_s/Ω	0.004
励磁绕组电阻 R_f/Ω	0.001
阻尼绕组 d 轴电阻 R_{Dd}/Ω	0.027
阻尼绕组 q 轴电阻 R_{Dq}/Ω	0.021 2
d 轴电枢反应电感 L_{ad}/mH	1.21
q 轴电枢反应电感 L_{aq}/mH	1.21
定子绕组漏感 L_{sl}/mH	0.087
励磁绕组漏感 L_{fl}/mH	0.130 6
阻尼绕组 d 轴漏感 L_{Ddl}/mH	0.111 7
阻尼绕组 q 轴自感 L_{Dql}/mH	0.079 8
极对数 n_p	3
转动惯量 J_m/(kg·m^2)	38
阻尼系数 D_m	4

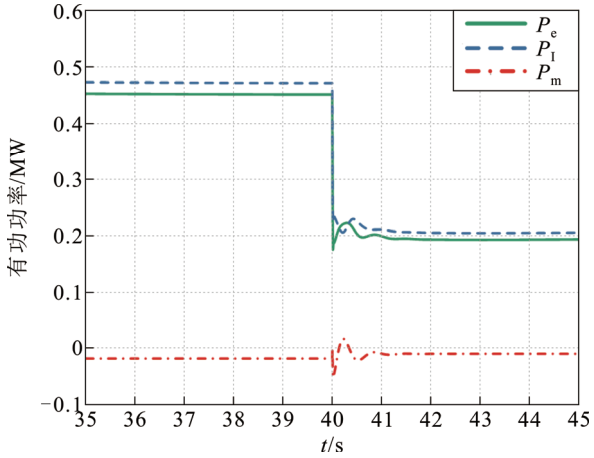


图 8 功率指令变化下的各端口有功功率

Fig.8 Active power at each port under power command change

差较小，满足功率传输要求。当输入电网功率指令发生变化时，变流器与 OW-WFSM 输出功率均能较快进行响应，快速跟随功率指令。

图 10 为并网点三相电流波形及快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析结果。可以看出并网电流正弦度较好，总谐波失真度(total harmonic distortion，THD)为 1.40%，满足并网要求。在功率指令变化瞬间，电流幅值随之减小，并快速恢复稳定。由于功率突变导致的电流谐波在半个周波(10 ms)内即可消除，对电网影响可忽略不计。

图 11 为 OW-WFSM 转速波形，即电网频率，其中 N 为电机转速。由图 11 可知，启动后经历短时振荡，电机转速稳定至同步转速，对应系统频率为 50 Hz。变流器与 OW-WFSM 的功率变化，未对

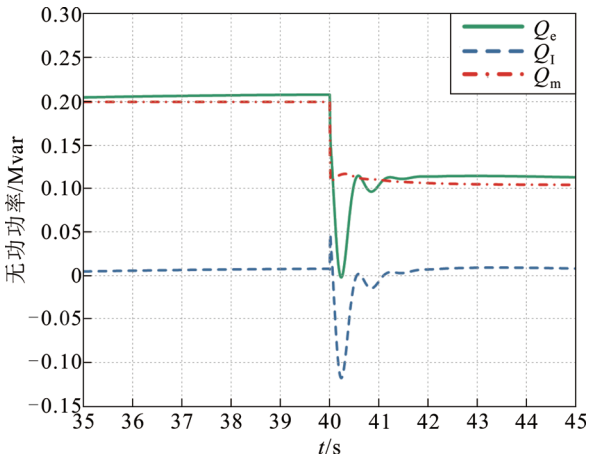


图 9 功率指令变化下的各端口无功功率

Fig.9 Reactive power at each port under power command variation

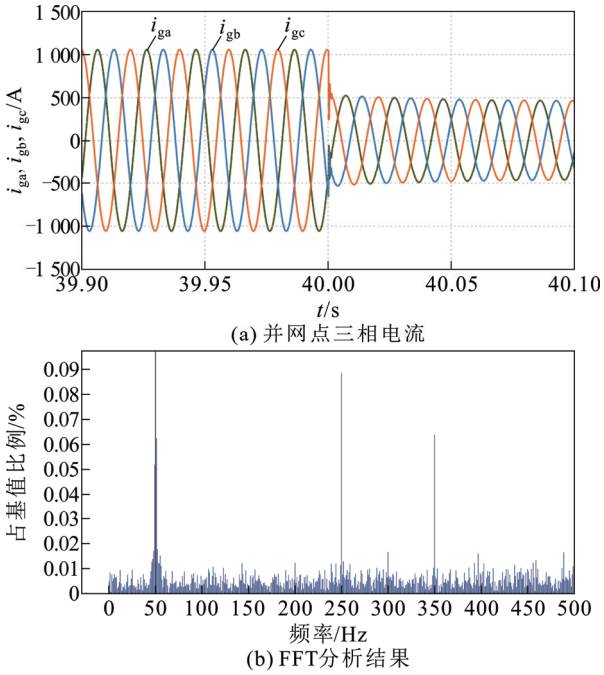


图 10 并网点三相电流及 FFT 分析结果

Fig.10 Three-phase current and FFT analysis results of parallel grid point

电机转速产生较大影响，产生的频率波动范围为−0.3~0.3 Hz，并在 0.5 s 内快速恢复同步转速。

4.2 暂态支撑能力对比

为了更好地验证本文所提控制策略对电网惯性和暂态支撑能力的提升作用，以变流器 PQ 控制、虚拟同步控制作为对照，不考虑一次调频作用，对负荷发生有功扰动的场景进行仿真验证。设定初始时刻负荷所需有功功率为 400 kW，其中，并网变流器输出有功 200 kW，电网供应负荷有功 200 kW。

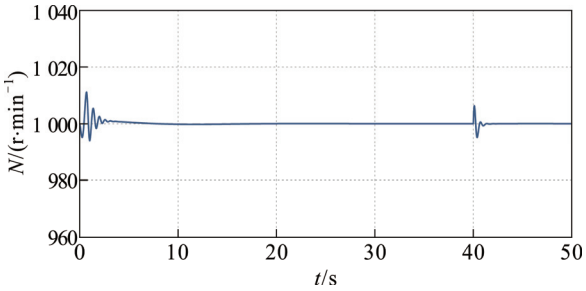


图 11　OW-WFSM 转速

Fig.11　Speed of the OW-WFSM

35 s 时负荷有功突增 20 kW。仿真结果如图 12—14 所示。

由图 12 可知，当负荷有功突增后，策略Ⅰ中并网变流器维持有功功率不变，无法自发地对功率缺额进行补充。策略Ⅱ中构网型变流器由于有功环节输出模拟同步电机转子运动方程，因此能够响应负荷变化，输出有功功率增加，但响应的速度较为缓慢。策略Ⅲ并网变流器能够自发响应负荷变化，输出有功功率会发生突增，发挥类似同步机的支撑效果，来瞬时支撑电网有功，功率响应的速度要明显快于构网型控制。

图 13 为 OW-WFSM 有功功率曲线，当负荷有功突增后，策略Ⅲ中 OW-WFSM 能够自发感应频率变化，释放转子动能，产生同步机惯量响应效果，延缓电网频率跌落速率，为后续调频动作争取时间。

图 14 为电网频率对比图，其中 f 为电网频率。当负荷有功突增后，由于策略Ⅰ并网变流器维持有功功率不变，功率缺额导致系统频率下降；由于电网内同步机的阻尼效果，系统频率不会持续跌落，最低点维持在 49.27 Hz。相比之下，策略Ⅱ、Ⅲ中并网变流器能够自发地调整有功输出，补偿电网有功功率缺额，减缓电网频率跌落速率。同时，策略Ⅲ中 OW-WFSM 具备无延时的惯量支撑能力，加之相位差闭环控制时延效果，双重作用下频率跌落速率相比策略Ⅱ得到更有效的减缓，频率最低点仅为 49.79 Hz。

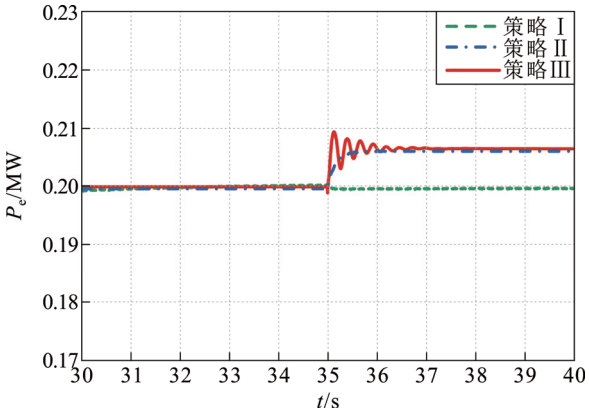


图 12　负荷有功突增下的并网点有功功率对比

Fig.12　Comparison of active power at grid-connected points under load active surge

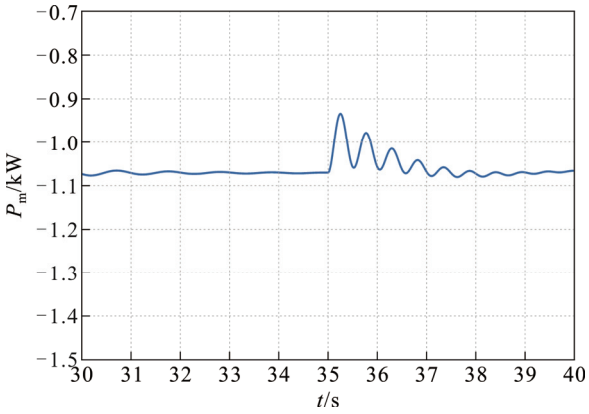


图 13　负荷有功突增下的 OW-WFSM 有功功率

Fig.13　OW-WFSM active power under load active surge

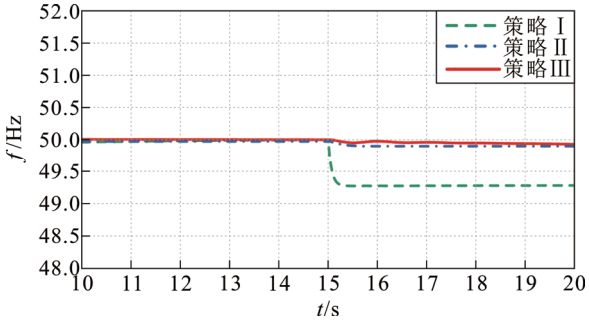


图 14　负荷有功突增下的电网频率对比

Fig.14　Grid frequency comparison under load active surge

5　结论

1）采用基于相位差闭环的变流器矢量控制策略生成变流器输出电压，进而调整电机转子与电网电压矢量的相对位置，可实现变流器输出功率的独立控制。

2）采用 OW-WFSM 励磁系统无功-电压协调控制策略控制励磁电压，可实现 OW-WFSM 向电网吸收或补偿无功功率的灵活调节，提升变流器容量利用率。

3）通过对系统暂态频率支撑能力的分析，证明了所提拓扑中 OW-WFSM 仍具备惯量响应能力。同时，采用电机转子位置定向的变流器能够自然增发有功，实现了电网惯量和暂态频率支撑能力的提升。

本研究可应用于新能源渗透率较高的区域电网末端，灵活提升新能源场站的转动惯量、变流器功率因数和动态功率支撑能力，为解决新型电力系

统电网惯量不足问题提供了新思路。

参考文献 References

[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] 徐 政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3805-3819.
XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819.

[3] 董旭柱，华祝虎，尚 磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[4] 陈宇航，王 刚，侍乔明，等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化，2015，39(5)：27-33.
CHEN Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33.

[5] 邹培根，孟建辉，王 毅，等. 灵活虚拟同步机主要控制参数对系统频率稳定性的影响分析[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1335-1342.
ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1335-1342.

[6] HOU X C, SUN Y, ZHANG X, et al. Improvement of frequency regulation in VSG-based AC microgrid via adaptive virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1589-1602.

[7] KARIMI A, KHAYAT Y, NADERI M, et al. Inertia response improvement in AC microgrids: a fuzzy-based virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4321-4331.

[8] XIONG L Y, LI P H, WU F, et al. Stability enhancement of power systems with high DFIG-wind turbine penetration via virtual inertia planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1352-1361.

[9] 邵昊舒，蔡 旭，周党生，等. 风电机组虚拟同步及惯量控制方法分析与测试评估[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1538-1547.
SHAO Haoshu, CAI Xu, ZHOU Dangsheng, et al. Analysis and test evaluation of VSG and virtual inertia control method for wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1538-1547.

[10] 耿 华，何长军，刘浴霜，等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3367-3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.

[11] 郭 强，李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(15)：6050-6063.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6063.

[12] 简 文，周自强，唐 飞，等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. 高电压技术，2021，47(1)：169-177.
JIAN Wen, ZHOU Ziqiang, TANG Fei, et al. Optimal configuration of synchronous condensers for suppressing multi-infeed DC commutation failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 169-177.

[13] GU H J, YAN R F, SAHA T K, et al. Zonal inertia constrained generator dispatch considering load frequency relief[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3065-3077.

[14] 杨松浩，李秉芳，赵天骐，等. 新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J]. 电力系统自动化，2023，47(3)：12-18.
YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 12-18.

[15] WEI S M, ZHOU Y K, HUANG Y Z. Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy[J]. IEEE Access, 2017, 5: 11505-11512.

[16] LI G J, SHANG E F, WU Q Y, et al. Frequency characteristics of the synchronous motor-generator pair to elevate the upper limit penetration rate of renewable energy sources[J]. IEEE Access, 2022, 10: 129599-129611.

[17] 陈基和，周强明，柴建云，等. 基于电磁耦合器调速的新变速恒频风力发电机组[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2011，51(3)：361-366.
CHEN Jihe, ZHOU Qiangming, CHAI Jianyun, et al. VSCF wind turbine generator based on an electromagnetic coupler[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2011, 51(3): 361-366.

[18] 由 蕊，柴建云，孙旭东，等. 电磁耦合调速风力发电机组模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报，2013，33(3)：92-98.
YOU Rui, CHAI Jianyun, SUN Xudong, et al. Experimental study of variable speed wind turbines based on electromagnetic couplers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 92-98.

[19] KWAK M S, SUL S K. Control of an open-winding machine in a grid-connected distributed generation system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1259-1267.

[20] PAN D, WANG Y, LIPO T A. A series regulated open-winding PM generator based constant voltage, variable frequency AC distribution system[C]//Proceedings of 2013 IEEE ECCE Asia Downunder. Melbourne, Australia: IEEE, 2013: 214-220.

[21] 刘 纯，李光辉，何国庆，等. 一种同步电机化的电力电子并网装置及其控制方法：113659629A[P]. 2021-11-16.
LIU Chun, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Synchronous motor-based power electronic grid-connected device and control method thereof: 113659629A[P]. 2021-11-16.

[22] 孙 丹，林 斌，周文志. 开绕组电机系统拓扑及控制技术研究综述[J]. 电工技术学报，2017，32(4)：76-84.
SUN Dan, LIN Bin, ZHOU Wenzhi. An overview of open winding electric machine system topology and control technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 76-84.

[23] 柯伟煌，孙 丹，马志豪，等. 考虑功率分配的混合供电型开绕组永磁同步电机过调制算法[J]. 电工技术学报，2023，38(12)：3176-3187.
KE Weihuang, SUN Dan, MA Zhihao, et al. An overmodulation scheme considering power distribution for hybrid-inverter driven open-winding permanent magnet synchronous motor system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3176-3187.



马志豪
1999—，男，硕士生
主要从事新能源发电并网技术方面的研究工作
E-mail: mazhihao@zju.edu.cn

MA Zhihao



孙 丹(通信作者)
1975—，女，博士，教授，博导
主要从事新能源发电控制技术方面的研究工作
E-mail: sundan@zju.edu.cn

SUN Dan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2024-04-10 修回日期 2024-11-05 编辑 程子丰