

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.002

储能/发电机级联式供电系统功率传输控制策略

马志豪, 孙丹, 年珩, 赵琛

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:随着可再生能源渗透率的不断提升,区域电网惯性逐步降低,暂态支撑能力严重不足,给电网带来了一系列安全问题。文中提出一种储能与开绕组永磁同步发电机(open-winding permanent magnet synchronous generator, OW-PMSG)级联供电的新型分布式并网发电拓扑,在保证可再生能源消纳的前提下,重新利用原有柴油机,为电网提供功率后备以及惯量支撑。通过对OW-PMSG进行建模以及系统功率流矢量分析,设计基于源网相位差闭环控制的功率传输策略,实现发电机的稳定同步运行。基于该策略,拓扑中的储能变流器可具备同步发电机特性,实现了电网惯性和暂态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:可再生能源;开绕组永磁同步发电机(OW-PMSG);储能系统;级联供电;分布式发电;暂态支撑

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0011-10

0 引言

随着“双碳”目标逐步推进,部分区域电网中的“高比例新能源、高比例电力电子器件”特征愈发明显。由于电力电子变流器不具备旋转元件,其为电网贡献的惯量几乎为零^[1-2],导致电网暂态频率支撑能力不足,新能源机组脱网的风险大大增加^[3]。同时,新能源发电的随机性与波动性也导致无法从根本上解决新能源发电固有的安全问题^[4]。因此,研究如何提升新能源供电可靠性具有重要意义。

分布式储能技术为解决以上问题提供了新思路。储能系统能够快速吸收或释放电能,消除昼夜峰谷差、促进新能源消纳、平滑功率波动^[5-10],在电网中得到了广泛应用。其中,储能系统的建模方法、控制策略、能量管理等均成为研究热点。文献[11]提出了一种用于提高风电接入的储能系统规划/运行综合优化模型,用以平滑可再生能源的出力特性,提高其外送能力。文献[12]针对分布式储能引起的节点电压越限问题,提出了一种集群储能调压控制策略,实现了储能运行过程中套利收益与网损收益最大,但仿真场景过于理想化,可能导致分析结果存在误差。目前,分布式储能系统应用技术领域的相关研究还有待深入,且其不具备惯量的本质仍未改变,不能为电网提供有效惯量支撑。

为提升区域电网惯性,有学者对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制进行了研究^[13-18],VSG通过在变流器外环控制中模拟同步发电机转子运动方程来调节有功-频率,使变流器具备

惯量响应能力。但相比于同步发电机的真实惯量与自然响应,VSG产生的虚拟惯量能否在实际电网的复杂暂态过程中发挥作用仍未被完全认证。

目前,研究人员也认识到同步发电机在电网构建中的重要作用。虽然传统发电机发电成本高、依赖能源补给,但其设备成熟、易于维护、惯量可靠的优势也是可再生能源不可替代的。基于此,有学者对可再生能源与常规发电机的协调组合供电开展了深入研究。文献[19]指出,为提高微电网供电可靠性,须在系统中配置传统发电机,当可再生能源出力无法满足负荷时,启动发电机进行功率补充。文献[20]进一步提出海上漂浮光伏系统与柴油发电机结合的供电方案,具有较大的经济效益,但光伏与发电机的组合为共交流母线形式,其并网点稳定性差,应对负荷扰动的能力较弱。针对新能源变流器与柴油机并联运行的形式,文献[21]研究其协调控制与无缝切换策略,避免了运行模式快速切换过程中易出现的过流现象,但其中双电源切换的过渡期较长,控制复杂度明显提高。文献[22]提出一种由新能源变流器与开绕组同步发电机串联的组合供电拓扑,与应用于电动汽车及风力发电的开绕组电机系统结构不同^[23-24],该拓扑中的开绕组电机两端与新能源变流器和电网直接连接。但文献[22]仅对该拓扑的有功功率传输进行了讨论,忽略了无功功率。针对上述拓扑的孤岛模式运行,文献[25]进一步提出一种随转子转速和负载水平变化的逆变器串联注入无功功率方案,但逆变器侧仅输出无功功率用于负载侧交流电压调节,可再生能源输出有功的能力被忽略。

综上所述,为进一步提升新能源供电可靠性,文中

收稿日期:2023-08-17;修回日期:2023-11-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFC3100304)

研究了一种储能系统与开绕组永磁同步发电机 (open-winding permanent magnet synchronous generator, OW-PMSG) 级联的分布式并网发电拓扑。为了实现发电机功率和储能侧功率的解耦控制, 分别针对电机停转、加速及同步运行状态对系统功率流进行分析。同时考虑有功、无功功率, 提出了基于源网相位差闭环的矢量控制策略, 以实现储能系统与柴油发电机功率的稳定控制。此外, 所提控制策略可确保变流器输出电压矢量动态跟踪电机的转子位置, 从而使储能变流器具备同步发电机特性。仿真研究验证了文中所提拓扑和控制策略的可行性和有效性。

1 系统拓扑及 OW-PMSG 建模

1.1 并网系统拓扑

文中所提分布式并网发电系统拓扑见图 1。储能变流器与电网之间串入开绕组同步发电机替代常规储能变流器的滤波电路, 左侧为 DC/AC 变换器, 直流侧接储能装置, 实现可再生能源直交变换; 中间为 OW-PMSG, 定子绕组三端子接逆变器, 另外三端子接电网, 发电机由柴油机拖动并以恒转矩模式运行。图 1 中, V_{dc} 为变流器的直流母线电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相定子电流; e_{ga} 、 e_{gb} 、 e_{gc} 为三相电网电压; L_{sa} 、 L_{sb} 、 L_{sc} 为三相定子电感; r_s 为定子电阻; T_m 为原动机转矩; P_t 、 Q_t 分别为逆变器侧输出有功、无功功率; P_m 、 Q_m 分别为 OW-PMSG 输出有功、无功功率, 近似为柴油原动机的输出功率; P_e 、 Q_e 分别为输入电网的有功、无功功率。各功率之间的关系为:

$$\begin{cases} P_t + P_m = P_e \\ Q_t + Q_m = Q_e \end{cases} \quad (1)$$

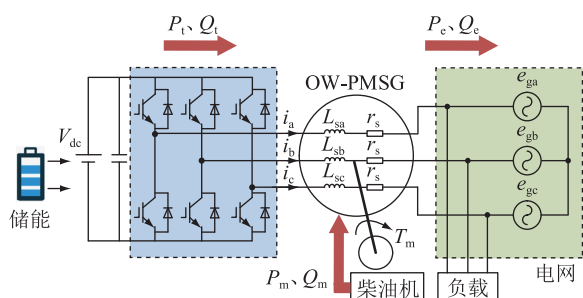


图 1 储能/OW-PMSG 级联并网拓扑

Fig.1 Energy storage/OW-PMSG cascade grid-connected topology

1.2 OW-PMSG 数学模型

OW-PMSG 无须改变 PMSG 原有的电磁设计与机械结构, 仅将常规 Y 接发电机定子绕组中性点打开, 呈现为双端口开放式绕组的形式^[26-27]。将 OW-PMSG 定子绕组三端子引出至逆变器, 另外三

端子接电网, 不仅能原动机能量馈入电网, 还能起到能流传递的作用。OW-PMSG 三相端电压与逆变器输出电压、电网电压之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} u_{ma} = u_{ca} - e_{ga} = S_a V_{dc} - e_{ga} \\ u_{mb} = u_{cb} - e_{gb} = S_b V_{dc} - e_{gb} \\ u_{mc} = u_{cc} - e_{gc} = S_c V_{dc} - e_{gc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{ma} 、 u_{mb} 、 u_{mc} 为 OW-PMSG 三相端电压; u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为变流器的三相输出电压; S_a 、 S_b 、 S_c 分别为变流器对应的 a、b、c 相的开关状态。

可知 OW-PMSG 并网系统输出端电压等于变流器输出电压和电网电压之差, 即:

$$U_m = U_c - E_g \quad (3)$$

式中: U_m 为变流器与电网在三相静止坐标系下的合成电压矢量; U_c 为变流器单独作用时的输出电压矢量; E_g 为电网电压矢量。

为实现一个变流器同时控制直流环节的功率和 OW-PMSG 产生的功率, 首先要推导和分析系统数学模型。

OW-PMSG 端电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{ma} \\ u_{mb} \\ u_{mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & r_s + pL_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & r_s + pL_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_f \cos \theta_r \\ \psi_f \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \psi_f \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: p 为微分算子; ψ_f 为永磁体磁链; θ_r 为电机转子位置角。

其机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = n_p (T_m - T_e) - D(\omega_r - \omega_{r0}) \quad (5)$$

式中: J 为电机转动惯量; ω_r 为电机转子电角速度; ω_{r0} 为与电网同频的转子电角速度; n_p 为电机极对数; T_e 为电磁转矩; D 为摩擦系数。

OW-PMSG 在 dq 坐标系下的定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴的定子磁链; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴的定子电感; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的定子电流。

d 、 q 轴的定子电压分量为:

$$\begin{cases} u_{md} = r_s i_d + pL_d i_d - \omega_r L_q i_q \\ u_{mq} = r_s i_q + pL_q i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{md} 、 u_{mq} 分别为 d 、 q 轴定子电压。

在 dq 坐标系下的电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2}n_p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2}n_p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (8)$$

文中 OW-PMSG 采用隐极式转子,即 $L_d = L_q = L_s$, L_s 为电机定子电感,则电磁转矩方程可简化为:

$$T_e = \frac{3}{2}n_p \psi_f i_q \quad (9)$$

2 功率传输控制策略

根据 OW-PMSG 的运行情况,该系统可有以下 2 种工作模式。

(1) OW-PMSG 停转。某些场合可采用储能单独供电、OW-PMSG 停转的工作模式。例如,从发电成本角度出发,如果发电机在夜间发电的成本高于储能发电的成本,则可停止 OW-PMSG。如果发电机停转,绕组可作为逆变器和电网之间的交流滤波器,以降低交直流变换器的脉宽调制电流纹波。

(2) OW-PMSG 与电网以同步速运行。当储能出力不稳定或发电成本更高时,可采用 OW-PMSG 同步速运行的工作模式,为电网(负荷)提供功率支持,从而提升电网稳定性。

工作模式不同,OW-PMSG 的控制算法也不同,须分别进行讨论。

2.1 功率流分析

为研究控制算法,首先需要对其 2 种工作模式以及启动加速时的功率流进行分析。系统电压、电流矢量关系如图 2 所示,发电机转子位置角 θ_r 与电网电压相角 θ_e 之差为 θ 。因发电机与电网串联,流过发电机的电流矢量与流入电网的电流矢量相同,均为 i_s 。针对 2 种不同的工作模式,文中提出 OW-PMSG 与电网各使用一套 dq 坐标系进行定向的方案。当发电机停转以及启动时,原动机的工作状态为不工作或调速器以给定转速为目标进行调速。由于电机未达到同步速,无法使用电机转子参考坐标系进行定向,因此采用电网电压参考坐标系建立电流 dq 轴定向系统, i_{gd} 、 i_{gq} 分别为电网电压定向下的 d 、 q 轴电流。当发电机同步运行时,原动机的工作状态为恒转矩模式,系统需要发电机输出功率恒定,因此要对电机转速进行控制以维持同步速运行,这也就需要对电机电磁转矩进行控制,而电磁转矩与电机 q 轴电流成正比。因此,采用电机转子参考坐标系建立电流 $d'q'$ 轴定向系统, i_{md} 、 i_{mq} 分别为转子位置定向下的 d 、 q 轴电流。

2.1.1 发电机停转时的功率分析

发电机停转时,转子转速为零,即 $\omega_r = 0$ 。采用

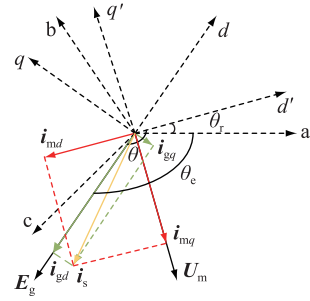


图 2 系统电压与电流矢量关系

Fig.2 System voltage and current vector relationship
电网电压参考坐标系,由式(3)和式(7)可知,逆变器输出电压 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{gd} \\ E_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & -\omega_e L_s \\ \omega_e L_s & r_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: u_{cd} 、 u_{cq} 分别为逆变器交流侧 d 、 q 轴电压; E_{gd} 、 E_{gq} 分别为电网 d 、 q 轴电压; ω_e 为电网电压矢量的电角速度; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为电网 d 、 q 轴电流模值; E_g 为电网电压矢量模值。

由此可得逆变器交流侧有功功率方程为:

$$P_t = \frac{3}{2}(u_{cd} i_d + u_{cq} i_q) = \frac{3}{2}r_s(i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2}p\left(\frac{1}{2}L_s i_d^2 + \frac{1}{2}L_s i_q^2\right) + \frac{3}{2}E_g i_d = P_s + P_e \quad (11)$$

式中: P_s 为定子绕组铜损和电感储能变化量之和,分析时可忽略不计。

逆变器交流侧无功功率方程为:

$$Q_t = \frac{3}{2}(u_{cq} i_d - u_{cd} i_q) = -\frac{3}{2}\omega_e L_s(i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2}E_g i_q \approx Q_e \quad (12)$$

其中 $1.5\omega_e L_s(i_d^2 + i_q^2)$ 为旋转产生的电感储能,因电机定子电感 L_s 数量级很小,分析时可忽略不计。

2.1.2 发电机启动加速时的功率分析

当柴油机开始启动,在由停转加速到同步速的过程中,假设发电机转子电角速度为 ω_r' ,以电网电压定向的 dq 坐标系为参考,加速过程中逆变器输出电压 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{gd} \\ E_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & -\omega_e L_s \\ \omega_e L_s & r_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_g \\ 0 \end{bmatrix} + \omega_r' \psi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta_e - \theta_r) \\ \sin(\theta_e - \theta_r) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由此可得逆变器交流侧、OW-PMSG 和电网有功功率方程分别为:

$$P_i = \frac{3}{2}(u_{cd}i_d + u_{cq}i_q) = \frac{3}{2}r_s(i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2}p\left(\frac{1}{2}L_s i_d^2 + \frac{1}{2}L_s i_q^2\right) + \frac{3}{2}E_g i_d + \omega_r' \psi_f i_d \cos(\theta_e - \theta_r) + \omega_r' \psi_f i_q \sin(\theta_e - \theta_r) \quad (14)$$

$$P_m = \omega_r' \psi_f i_d \cos(\theta_e - \theta_r) + \omega_r' \psi_f i_q \sin(\theta_e - \theta_r) = \frac{1}{n_p} T_m \omega_r' \quad (15)$$

$$P_e = \frac{3}{2}(E_{gd}i_d + E_{gq}i_q) = \frac{3}{2}E_g i_d \quad (16)$$

因此,在电机由原动机驱动以额定转矩加速的过程中,随着 ω_r' 的增加,发电机输出功率会不断增加,逆变器输出功率会不断减少,由于此时控制策略为功率闭环控制,二者之和即输入电网的功率维持不变,实现了在停转到同步速过程中功率由逆变器到 OW-PMSG 的转移。

2.1.3 发电机同步运行时的功率分析

采用发电机转子参考坐标系,逆变器输出电压 d, q 轴分量为:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & r_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix} + E_g \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \theta_e) \\ -\sin(\theta_r - \theta_e) \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: i_{md}, i_{mq} 分别为转子位置定向下 d, q 轴电流模值。

由电压方程可以得到逆变器交流侧有功功率方程为:

$$P_i = \frac{3}{2}r_s(i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2}p\left(\frac{1}{2}L_s i_d^2 + \frac{1}{2}L_s i_q^2\right) + \frac{3}{2}\omega_r \psi_f i_q + \frac{3}{2}E_g(i_d \cos(\theta_r - \theta_e) - i_q \sin(\theta_r - \theta_e)) = P_s - P_m + P_e \quad (18)$$

其中, $1.5\omega_r \psi_f i_q$ 为发电机机械轴的功率,即原动

机的输出功率。

无功功率方程为:

$$Q_i = -\frac{3}{2}\omega_r L_s(i_d^2 + i_q^2) - \frac{3}{2}\omega_r \psi_f i_d + \frac{3}{2}E_g(i_q \cos(\theta_r - \theta_e) + i_d \sin(\theta_r - \theta_e)) = -Q_m + Q_e \quad (19)$$

2.2 功率控制策略

2.2.1 发电机停转时的功率闭环控制策略

由式(11)和式(12)可知,通过控制直轴电流 i_d 可以直接控制输入到电网及负载的有功功率 P_e ; 通过控制交轴电流 i_q 可直接控制输入到电网及负载的无功功率 Q_e 。图 3 为 OW-PMSG 停转时储能/OW-PMSG 级联并网系统的控制框图。图中, P_e^*, Q_e^* 分别为输入电网的有功功率给定值和无功功率给定值; i_d^*, i_q^* 分别为 d, q 轴的定子电流给定值; $u_{m\alpha}, u_{m\beta}$ 为静止两相坐标系下的定子电压分量; $e_{g\alpha}, e_{g\beta}$ 为静止两相坐标系下的电网电压分量; e_{gabc} 为电网三相电压分量; $u_{\alpha}^{ref}, u_{\beta}^{ref}$ 为静止两相坐标系下的逆变器输出电压分量; T_m^* 为发电机转矩给定值; SVPWM 为空间矢量脉宽调制; PI 为比例积分控制器。由于发电机停转,发电机与电网无能量交互,仅定子绕组以滤波器形式参与系统。根据分析得到的功率与电流对应关系,采用功率外环+电流内环的双闭环矢量控制策略,实现输入到电网及负载的有功功率 P_e 、无功功率 Q_e 的控制。

2.2.2 发电机同步运行的源网相位控制策略

由式(18)和式(19)可知,通过控制交轴电流 i_q 可直接控制发电机有功功率 P_m ; 通过控制直轴电流 i_d 可直接控制发电机无功功率 Q_m ; 而输入到电网及负载的有功功率 P_e 与无功功率 Q_e 是关于 d, q 轴电流的函数,同时也取决于相位差 θ 。

为了实现有功、无功功率与 d, q 轴电流解耦,需要对 θ 进行控制。因此,须针对不同情况进行分析。

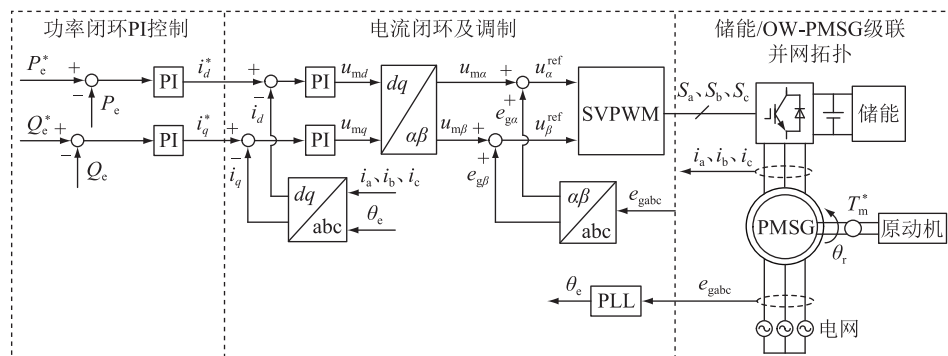


图 3 OW-PMSG 停转系统功率闭环控制框图

Fig.3 OW-PMSG stall system power closed loop control block diagram

(1) 当 $\theta=0$ 或 π 时,电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & r_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pm E_g \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix} \quad (20)$$

有功功率方程为:

$$P_t = \frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_q \pm \frac{3}{2} E_g i_d \quad (21)$$

无功功率方程为:

$$Q_t = -\frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_d \pm \frac{3}{2} E_g i_q \quad (22)$$

在这 2 种相位差下,有功、无功功率均与 d 、 q 轴电流相关,无法实现功率解耦控制与独立调节。

(2) 当 $\theta=3\pi/2$ 时,电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & r_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_g \end{bmatrix} \quad (23)$$

有功功率方程为:

$$P_t = \frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_q + \frac{3}{2} E_g i_q \quad (24)$$

无功功率方程为:

$$Q_t = -\frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_d - \frac{3}{2} E_g i_d \quad (25)$$

此时,在给定功率指令为正向的情况下,功率流向并没有如预期的由逆变器和发电机流向电网,而是相反,由电网向储能侧充能,与文中的设计目标不符。

(3) 当 $\theta=\pi/2$ 时,电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & r_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -E_g \end{bmatrix} \quad (26)$$

有功功率方程为:

$$P_t = \frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_q - \frac{3}{2} E_g i_q = -P_m + P_e \quad (27)$$

无功功率方程为:

$$Q_t = -\frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_d + \frac{3}{2} E_g i_d = -Q_m + Q_e \quad (28)$$

此时,逆变器侧与发电机侧能量均流向电网,符合供电系统要求。通过有功、无功功率指令 P_e^* 、 Q_e^* 可得到有功电流的给定值 i_q^* 和无功电流的给定值 i_d^* 。而稳态下 $T_e = T_m$,由式(9)可知, i_q^* 取决于原动机转矩 T_m ,电机转子位置角与电网电压角之间的相角差给定值 θ^* 为 $\pi/2$ 。

图 4 为 OW-PMSG 同步运行储能并网系统的源网相位控制框图。采用相位环+电流环的矢量控制方法,对电机转子位置角 θ_r 进行采样,对电网电压锁相获取电网电压相角 θ_e ,通过相位闭环控制,维持电机转子角度与电网电压相角差恒定为 $\pi/2$ 。实现有功、无功功率与 d 、 q 轴电流的解耦。

有功功率电流 i_q 与原动机转矩 T_m 成正比。由电网有功功率指令 P_e^* 与电机励磁磁链可以求得原动机转矩 T_m ,间接实现对有功功率电流 i_q 的控制。无功功率电流给定值 i_d^* 由电网无功功率指令 Q_e^* 根据式(25)计算得到。

2.2.3 系统惯量响应

电网故障或负荷有功突增会引起系统有功缺额,从而导致电网频率降低。由于文中所提逆变器控制策略是通过相位差闭环控制来维持电机转子角度与电网电压相角差恒定为 $\pi/2$,所以 OW-PMSG 转子转速会同步降低。

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_{r0} (\omega_r - 1) \quad (29)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{n_p^2}{J\omega_r} (P_M - P'_G) - \frac{D(\omega_r - \omega_{r0})}{J} \quad (30)$$

式中: P_M 为发电机输入功率; P'_G 为发电机输出电磁功率。

由于阻尼作用,OW-PMSG 转速不会持续降低,而是会达到一个新的平衡点。在此过程中,转子动

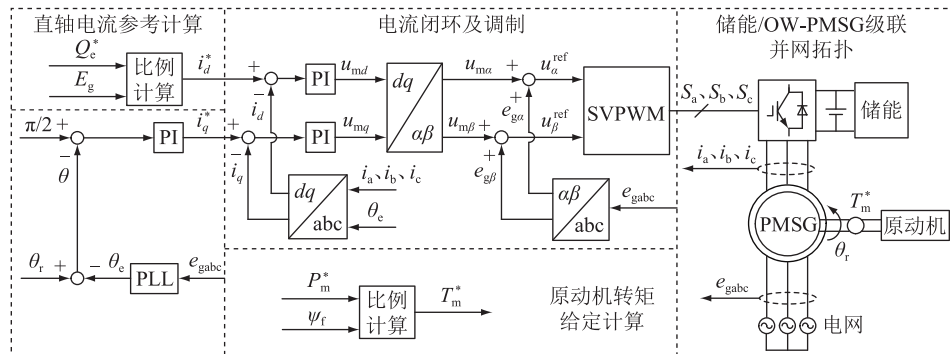


图 4 OW-PMSG 同步运行源网相位控制框图

Fig.4 OW-PMSG synchronous operation source grid phase control block diagram

能也在相应发生变化。因为未考虑一次调频作用,所以施加到转子上的机械功率保持不变,转子动能的变化量将以电磁功率的形式注入电网中,此功率即为惯量支撑。

同时,由于文中所提拓扑的级联属性,流过变流器与 OW-PMSG 的电流为同一电流,OW-PMSG 输出电磁功率突增即流过定子绕组的电流突增,进而导致逆变器输出有功功率突增,从而使逆变器具备同步发电机的惯量响应能力。

3 仿真分析

为验证文中所提拓扑和基于源网相位控制的功率传输策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 进行仿真建模与分析。仿真中采用直流稳压源对储能进行简化。仿真系统中的参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	800
开关频率 f_{pwm}/kHz	10
定子电阻 r_s/Ω	0.029 8
d 轴定子电感 L_d/mH	0.572
q 轴定子电感 L_q/mH	0.572
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.302 4
极对数 n_p	2
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	1.1
摩擦系数 D	1.5

文中分别针对 OW-PMSG 停转、启动加速、同步运行和负荷突变 4 种工况进行仿真验证。

3.1 OW-PMSG 停转

给定电网有功功率指令为 100 kW,无功功率指令为 50 kvar。图 5 为电网端口、储能逆变器端口和 OW-PMSG 端口的有功、无功功率。由于 OW-PMSG 停转时,与系统无能量交互,所以 P_m 、 Q_m 近似为 0 (P_m 的误差是由电机铜损产生)。 $P_t \approx P_e$ 、 $Q_t \approx Q_e$,说明此时输入电网的能量完全由储能提供,与前文分析一致。

3.2 OW-PMSG 启动加速与控制切换

OW-PMSG 由停转加速至同步速:初始时刻电机停转,采用图 3 所示的控制策略,给 OW-PMSG 施加额定转矩使其启动,控制其转速以斜坡信号上升,到达同步速后,将控制方式切换为图 4 所示的控制策略,即将外部的功率闭环切换为相位闭环,同时参考坐标系切换为以电机转子位置角定向的 dq 坐标系,实现柴油机开始启动由零加速到同步速的

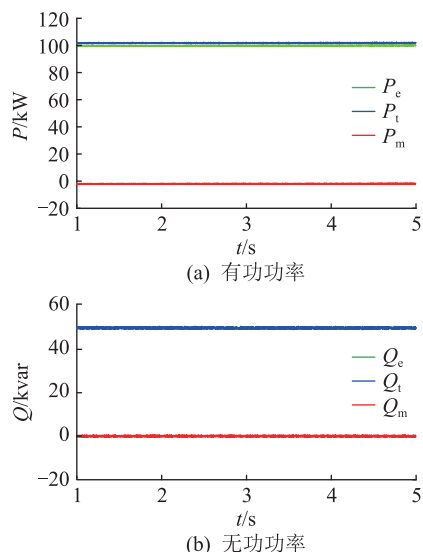


图 5 OW-PMSG 停转时各端口功率
Fig.5 Power of each port when OW-PMSG is stopped

模式切换。

给定输入电网功率为 100 kW,设置 OW-PMSG 转速以斜坡信号上升,到达同步速后,进行控制方式的切换,仿真结果如图 6—图 8 所示。

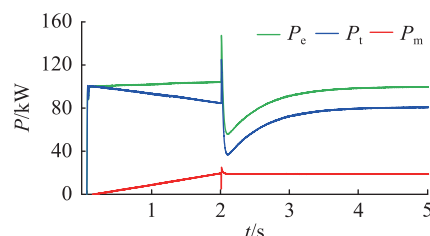


图 6 OW-PMSG 启动过程系统各端口功率
Fig.6 Power of each port in the process of OW-PMSG startup

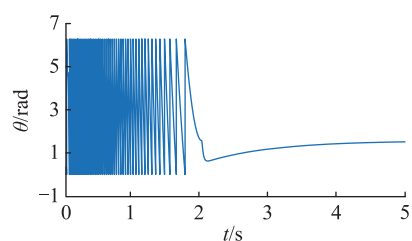


图 7 OW-PMSG 启动过程相位差曲线
Fig.7 Phase difference curve in the process of OW-PMSG startup

由图 6 可知,各端口功率变化趋势与前文分析一致。在电机加速过程中,发电机输出功率不断增加,逆变器输出功率不断减少,输入电网的功率维持不变。在 2 s 时转速到达同步速,控制策略实施切换,由图 7 和图 8 可知,控制策略切换瞬间,由于存在由电网电压定向的 dq 坐标系到电机转子位置

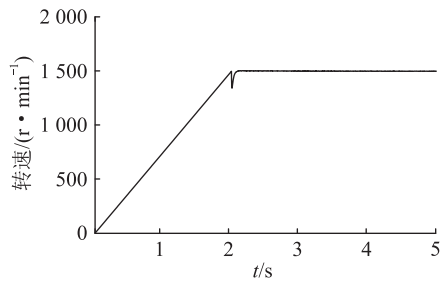


图8 OW-PMSG启动过程转速曲线
Fig.8 Speed curve in the process of OW-PMSG startup

角定向的 dq 坐标系的切换,相位会出现瞬时误差,发电机转速会产生瞬时跌落,逆变器输出功率同样会发生跌落,随着相位闭环控制作用,相位误差逐渐消除,逆变器输出功率逐渐回升至给定值。控制方式切换约 2 s 后,系统恢复稳态。

3.3 电机与电网频率同步运转

设定初始时刻电网有功功率指令为 100 kW,无功功率指令为 50 kvar,6 s 时有功功率指令突加为 150 kW,9 s 时突减为 50 kW。图 9 为相位差 θ 、电机转速和电磁转矩 T_e 的波形。根据图 9(a)可知,相位差 θ 维持在 $\pi/2$,转矩突变带来的相位误差会快速消除。由图 9(b)可知,电机可自发按同步速稳定运行,转矩变化会引起一定的转速波动,但可忽略不计。由图 9(c)可知,电磁转矩与电网有功功率指令成正比,与前述理论分析一致。

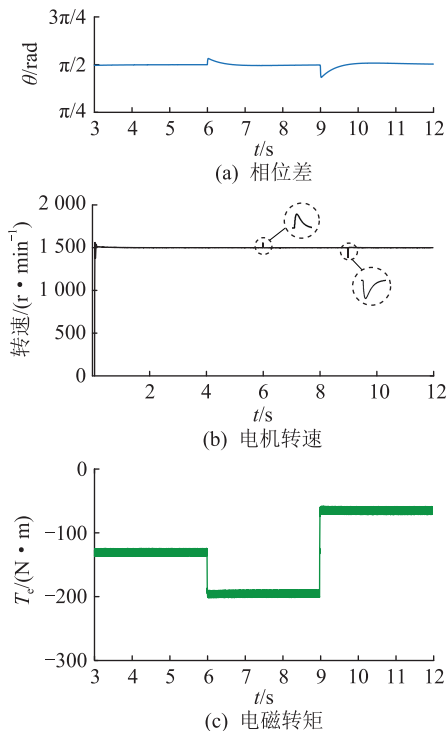


图9 控制系统仿真结果
Fig.9 Control system simulation results

图 10 为并网点三相电流 i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 的仿真波形以及快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 分析结果。可以看出,并网点电流正弦度较好,总谐波失真度 (total harmonic distortion, THD) 为 1.43%,满足并网要求。

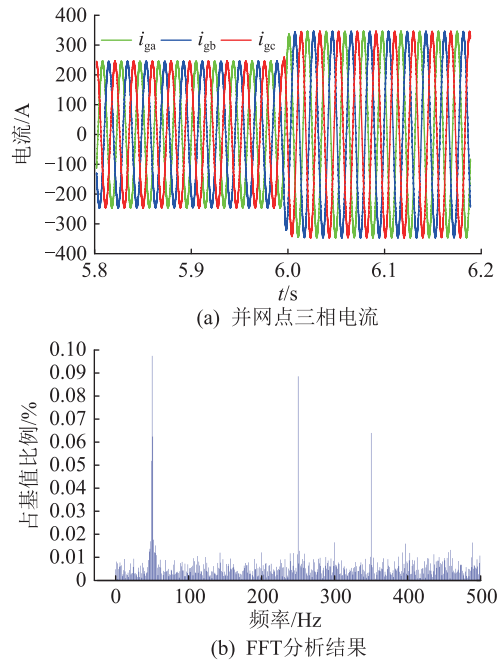


图10 并网点三相电流仿真波形及 FFT 分析结果

Fig.10 Three-phase current simulation waveforms at grid-connected point and FFT analysis results

图 11 为电网端口、储能变流器端口以及 OW-PMSG端口的有功、无功功率波形。各项功率满足式(1),稳态下输入电网有功功率和无功功率符合电网调度指令。由图 11(a)可知,储能与发电机同时出力。当功率指令突变时输入电网功率能够快速响应与跟随,同时,储能与发电机出力占比不变。由图 11(b)可知,无功功率因相位差变化会出现小幅波动,但可逐渐平抑,总体验证了所提功率传输策略的可行性。

3.4 负荷突变

为更真实地反映负荷扰动对供电系统带来的影响,以所提拓扑与电网同时向负荷供电的场景为例进行仿真验证。仿真中采用同步机替代理想三相电压源对电网进行模拟。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 200 kW,无功功率为 0,其中所提变流器与 OW-PMSG 级联供电拓扑输出有功 100 kW,电网输出有功 100 kW。5 s 时负荷有功突增 20 kW。仿真结果如图 12 所示。

由图 12 可知,当负荷有功突增后,OW-PMSG 输出的有功功率以及储能变流器输出的有功功率

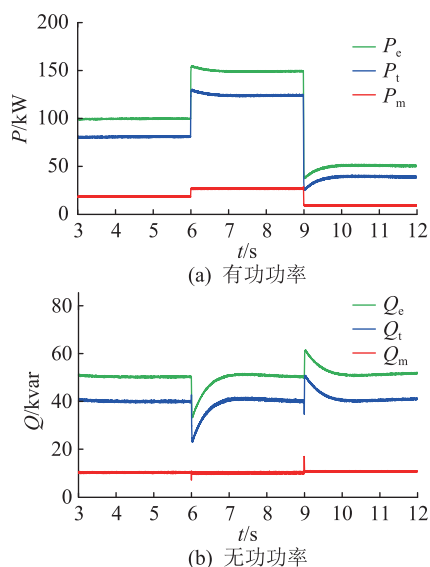


图 11 OW-PMSG 同步运行时各端口功率

Fig.11 Output power of each port when OW-PMSG is running at a synchronous speed

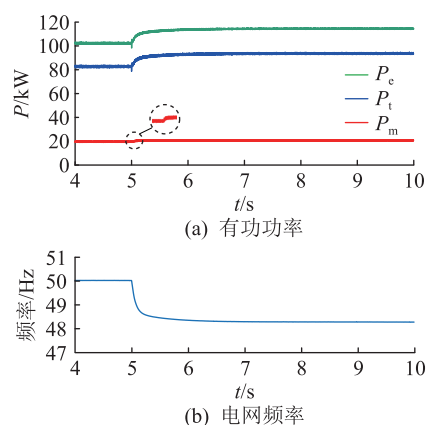


图 12 负荷突增下系统各端口功率及电网频率

Fig.12 Power and grid frequency of each port of the system under sudden load increase

都会发生突增,发挥类似同步机惯量支撑的作用,来瞬时支撑电网有功,减小电网频率跌落。

因此,通过文中所提拓扑及相应的控制策略,变流器在暂态过程中可以具有和同步机一致的惯量支撑特性。所提储能/OW-PMSG 级联供电系统可以等效为一台惯量更大的同步机,附加惯量的大小取决于储能系统与 OW-PMSG 传输有功功率之比,比值越大,等效惯量越大,从而达到同步机小惯量引发系统大惯量的效果,可以在解决如今电网惯量不足的问题中发挥重要作用。

4 结论

文中提出了一种储能与同步发电机级联并网发电系统,为可再生能源与同步发电机的协调统一供电提供了新思路。分别针对电机停转、启动以及

同步运行 3 种状态进行了系统功率流的分析,揭示了系统机侧、网侧、储能侧功率与电机转子位置之间的耦合关系,并提出了基于源网相位差闭环的功率解耦控制策略。通过仿真对所提控制策略进行验证,结果表明:

(1) 稳态下,通过控制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,可以实现储能变流器与同步发电机输出功率的灵活调节与独立控制。

(2) 暂态下,所提源网相位闭环控制策略可确保变流器输出电压矢量动态跟踪电机的转子位置,从而使储能变流器具备同步发电机的惯量响应特性,实现了电网惯量和暂态支撑能力的提升。

参考文献:

[1] 郑超,王士元,张波琦,等. 光伏高渗透电网动态频率特性及应对措施[J]. 电网技术,2019,43(11):4064-4073.
ZHENG Chao, WANG Shiyuan, ZHANG Boqi, et al. Dynamic frequency characteristics and countermeasures of power grid with highly penetrated photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4064-4073.

[2] DATTA U, KALAM A, SHI J. Battery energy storage system control for mitigating PV penetration impact on primary frequency control and state-of-charge recovery[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2):746-757.

[3] YOO Y, JUNG S, JANG G. Dynamic inertia response support by energy storage system with renewable energy integration substation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2):260-266.

[4] 张思,杨晓雷,阙凌燕,等. 高比例光伏发电对浙江电网电力平衡的影响及应对策略[J]. 浙江电力,2022,41(11):9-16.
ZHANG Si, YANG Xiaolei, QUE Lingyan, et al. The impact of high-proportion photovoltaic power generation on the power balance of Zhejiang power grid and its countermeasures[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(11):9-16.

[5] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):3652-3666.

[6] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术,2022,41(2):67-74.
YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2):67-74.

[7] BYRNE R H, NGUYEN T A, COPP D A, et al. Energy management and optimization methods for grid energy storage systems[J]. IEEE Access, 2017, 6:13231-13260.

[8] 龚一平,王晨晖,修晓青,等. 大规模储能技术及多功能应用研究综述[J]. 供用电,2023,40(2):68-77.

- GONG Yiping, WANG Chenhui, XIU Xiaoqing, et al. Overview of large-scale energy storage technology and multi-function application[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(2):68-77.
- [9] 刘欣, 宁新福, 金翼, 等. 配电网分布式储能的分层优化配置方法[J]. *浙江电力*, 2023, 42(5):95-104.
- LIU Xin, NING Xinfu, JIN Yi, et al. A hierarchical optimal configuration method for distributed energy storage in distribution networks[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(5):95-104.
- [10] 李翠萍, 闫佳琪, 孙大朋, 等. 配电网中储能参与多场景的多维经济性评估[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(5):471-479.
- LI Cuiping, YAN Jiaqi, SUN Dapeng, et al. Multi-dimensional economic evaluation of energy storage participating in multi-scenarios in distribution network[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(5):471-479.
- [11] 贾雨龙, 米增强, 刘力卿, 等. 分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(4):1-7, 16.
- JIA Yulong, MI Zengqiang, LIU Liqing, et al. Comprehensive optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(4):1-7, 16.
- [12] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(4):133-141.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(4):133-141.
- [13] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4):4648-4661.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. *发电技术*, 2022, 43(5):679-686.
- LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(5):679-686.
- [17] 赵旭阳, 郭昆丽, 吕家君, 等. 孤岛模式下基于线性自抗扰VSG控制的频率支撑技术[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7):17-26.
- ZHAO Xuyang, GUO Kunli, LÜ Jiajun, et al. The frequency support technology based on linear active disturbance rejection VSG control in the islanding mode[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(7):17-26.
- [18] 郝翊帆, 郭昆丽, 郝翊彤, 等. 微网储能动态虚拟同步机控制及超级电容单元配置研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2022, 43(6):110-117.
- HAO Yifan, GUO Kunli, HAO Yitong, et al. Research on control of dynamic virtual synchronizer and configuration of super capacitor unit for micro grid energy storage[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2022, 43(6):110-117.
- [19] BAÑOS R, MANZANO-AGUGLIARO F, MONTOYA F G, et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(4):1753-1766.
- [20] TOFANI A F, GARNIWA I, FAJRY F R. Techno-economic analysis of sea floating PV/diesel hybrid power plant with battery arrangement scheme for residential load at remote area in Indonesia (case study: small kei island, south East Moluccas)[C]//2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS). Pangkal, Indonesia. IEEE, 2019:243-246.
- [21] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25):70-78, 12.
- GUO Li, FU Xiaopeng, LI Xialin, et al. Coordinated control of battery storage and diesel generators in isolated AC microgrid systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25):70-78, 12.
- [22] 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.
- [23] 孙丹, 林斌, 陈敏, 等. HEV用开绕组永磁同步电机双逆变器协同控制[J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(2):29-35.
- SUN Dan, LIN Bin, CHEN Min, et al. Coordinate control of dual-inverter driven open-winding PMSM for hybrid electric vehicles[J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(2):29-35.
- [24] 蒋栋, 高加楼, 李柏杨, 等. 电动汽车电机驱动系统零转矩充电复用技术简介[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(19):4862-4871.
- JIANG Dong, GAO Jialou, LI Boyang, et al. Introduction of integrated motor drive-charger technologies for electric vehicle with zero torque[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(19):4862-4871.
- [25] PAN D, WANG Y, LIPO T A. A series regulated open-winding PM generator based constant voltage, variable frequency AC distribution system[C]//2013 IEEE ECCE Asia Downunder. Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2013:214-220.
- [26] 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 wind-

ing electric machine system topology and control technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (4):76-84.

[27] 年珩,曾恒力,周义杰. 共直流母线开绕组永磁同步电机系统零序电流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 40-48.

NIAN Heng, ZENG Hengli, ZHOU Yijie. Zero sequence current suppression strategy for open winding permanent magnet synchronous motor with common DC bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20):40-48.

作者简介:



马志豪

马志豪(1999),男,硕士在读,研究方向为新能源发电并网技术(E-mail:mazhihao@zju.edu.cn);

孙丹(1975),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为新能源发电运行与控制技术;

年珩(1978),男,博士,教授,国家自然科学基金杰出青年基金获得者,研究方向为新能源技术、交直流混合供电等。

Power transmission control strategy of energy storage/generator cascaded power supply system

MA Zhihao, SUN Dan, NIAN Heng, ZHAO Chen

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of renewable energy, the inertia of the power grid gradually decreases, and the transient support capacity is seriously insufficient. It brings a series of security problems to the power grid. A distributed grid-connected topology cascaded by energy storage and open-winding permanent magnet synchronous generator (OW-PMSG) is proposed in this paper. By the topology, the renewable energy can be consumed. At the same time, the diesel engines can provide power backup and inertia support. By modelling the OW-PMSG and analyzing the power flow vector, a power transfer strategy based on the source-grid phase closed-loop control is designed to achieve stable synchronous operation of the generator. Based on this strategy, the energy storage converter can have synchronous generator characteristics, which achieves further improvement of grid inertia and transient support capability. The simulation results verify the feasibility of the proposed control strategy.

Keywords: renewable energy; open-winding permanent magnet synchronous generator (OW-PMSG); energy storage system; cascade power supply; distributed generation; transient support

(编辑 陆海霞)