

基于双绕组异步电机的并网逆变系统及其多工况控制策略

包芳泉, 杨淑英, 谢 震, 张 兴

(合肥工业大学电气工程与自动化学院, 合肥 230009)

摘 要: 提出一种基于双绕组异步电机的并网逆变系统。利用双绕组异步电机具有两个电气接口的特点, 将其作为新能源与电网之间的能量转换枢纽。在完成新能源并网的同时增强电力系统的电机特性。为使其具有应用价值, 重点研究其控制策略。在分析双绕组异步电机运行特性的基础上, 针对不同的运行工况, 设计一套多工况控制策略, 可以满足启动、投网、并网运行和离网运行的控制需求。实验结果验证所提控制策略的有效性。

关键词: 新能源; DC-AC逆变器; 异步电机; 双绕组; 并网接口; 多工况控制策略

中图分类号: TM464

文献标志码: A

0 引 言

为应对气候变化, 保护自然环境, 实现电力行业的“双碳”目标, 以风电、光伏为代表的新能源装机容量持续攀升。然而, 随着新能源渗透率的提升, 并网逆变器代替了大量的同步发电机, 使得电力系统正在逐步丧失同步发电机支撑特性, 出现短路容量降低、频率波动、宽频振荡等问题, 导致逆变器并网系统稳定性问题频发, 电网运行可靠性降低, 制约了新能源的发展。造成这些现象的关键在于电力电子并网逆变器自身的过流能力差、惯量缺失、滤波器振荡以及控制的延迟、限幅以及正反馈效应。

电力电子设备之间以及电力电子设备与电网之间的相互作用, 会引发电力系统的宽频振荡^[1-2]。近年来宽频振荡案例不断见于报道^[3-4]。滤波器和锁相环(phase-locked loop, PLL)是这种宽频振荡产生的两个关键因素。由于脉宽调制的滤波需求和当前广泛采用的逆变器拓扑的电压源特性, 使得逆变器需要通过滤波器才能接入电网。出于成本和功率密度考虑, 目前多采用 LC 或 LCL 高阶滤波器, 其固有谐振特性能够激发系统的振荡。通过引入有源阻尼控制算法, 理论上能够增加系统阻尼, 抑制振荡。但其实际抑制效果受到逆变器非线性、控制的延迟和电压饱和限幅的影响, 且随着电网容量的降低, 频繁变化的电网阻抗导致交流滤波器谐振频率的变化, 进一步降低了有源阻尼控制的实际效果。PLL 是跟网型并网变流器必不可少的环节, 其弱网情况下的容性负阻尼特性会导致系统相角裕度减小, 振荡风险增加^[5]。实际

上, 不仅 PLL 本身的动态过程会影响系统稳定性, PLL 与内外环控制之间的交互作用也会对系统稳定性产生影响, 且随着电网强度的减弱其影响愈发显著^[6]。为抑制宽频振荡通常可借助优化并网变流器控制结构、控制参数以及锁相环等措施, 但实际效果受电网阻抗的影响较大, 且电网阻抗难以实时感知, 这实际上也导致众多阻抗重塑抑制宽频振荡方案的局限性^[7]。构网型控制方案试图通过功率同步避免 PLL 引起的振荡问题, 但其稳定性依然受到电网阻抗的影响, 且滤波器振荡现象依然存在。与电力电子逆变器并网方案不同, 传统同步发电机并网无需滤波器和 PLL, 因此从根源上避免了宽频振荡问题。

电力电子变流器本身不具有机械关系, 不具有同步发电机的惯量阻尼特性, 不能对电网频率波动进行主动阻尼^[8]。风电机组惯性、新能源发电的降容备用方案以及储能配置方案, 理论上可通过变流器控制算法抑制电网频率波动, 但其实际响应性能受到控制算控制延迟的影响, 甚至在延迟较大时会激发新的振荡。随着新能源电网渗透率的攀升, 同步发电机存量在减少, 电力系统中惯量缺口越来越大^[9-10]。惯量缺失的危害已伴随着多次大停电事故显现^[11]。

同步发电机的电压和频率耐受能力都较强, 发生短路故障时可以提供大短路电流, 且这一过程完全取决于发电机自身特性, 不受控制算法制约。而电力电子变流器电压、频率耐受能力相较于同步发电机较弱, 在电网电压、频率发生波动时容易造成新能源机组脱网, 引发严重事故^[12]。电力电子变流器在电网发生短路故障时不存在类似电机的次暂态过

收稿日期: 2025-02-13

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4202301)

通信作者: 杨淑英(1980—), 男, 博士、教授, 主要从事新能源并网与电机控制方面的研究。yangsy@hfut.edu.cn

程,初始短路电流值较低,并且稳态短路电流也会由于较高的内电抗和电流限幅控制作用而迅速降低,使得变流器短路电流幅值小且持续时间短。因此,随着新能源比例的增加,电网短路容量减少,系统强度减弱^[13]。

综上,可以发现并网逆变器使电力系统所具备的同步发电机特性减弱,从而引发稳定性问题。为使高比例新能源电力系统重新获得同步发电机特性,众多学者进行了大量的技术尝试,如虚拟同步发电机技术、调相机和以电机为接口的并网拓扑等。虚拟同步发电机技术试图通过并网逆变器控制算法的设计使其模拟同步发电机的外特性,从而能够自主构建电压和频率,获得独立运行能力^[14]。但若要求其具备惯量阻尼作用,一般需要配备储能装置,导致成本大幅增加^[15]。虚拟惯量的输出存在控制延时,并且惯量释放完之后储能能量不能自恢复。虚拟同步机还限制了变流器运行效率、动态响应特性和灵活性^[16],还存在控制参数整定困难的问题,容易产生功角振荡^[17]。由于电力电子并网逆变器的交流电感通常较小,而电网的等效阻抗又会随着局部发电量的变化而发生变化,当电网等效阻抗较小时,呈现受控电压源特性的虚拟同步机控制算法也会出现稳定性问题。同步发电机输出端虽然也会呈现电压源特性,但其自身输出阻抗较大,能够克服电网阻抗变化,对电网有着宽范围适应性^[18]。

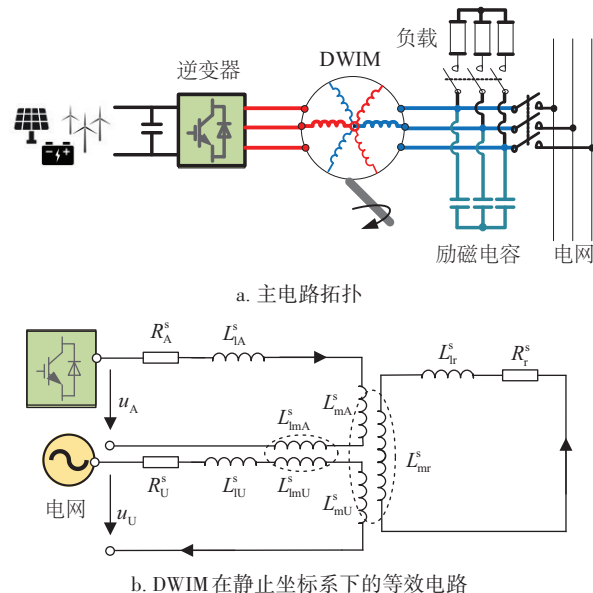
调相机具有较好的瞬时无功补偿能力和暂态无功响应特性,过载能力与同步发电机相当,且能提供一定的旋转惯量和短路容量^[19],比较契合高比例新能源电力系统的需求,近年来大量应用于新能源发电场站,提升电网稳定性。但调相机本质上是电网的一种负载,不能向电网输送稳定的有功功率,无法作为新能源发电或储能装置的并网接口。

文献[20]提出一种新能源“电机对”并网方案,利用一对同轴连接的同步电动机和同步发电机作为新能源并网接口。但这种并网拓扑需要两台电机和两套励磁装置,结构过于复杂,且功率传输需要经过原动机定子-气隙-转子-机械转轴到发电机转子-气隙-定子的路径送入电网,传输效率不高。文献[21]提出一种基于开绕组电机的并网拓扑,能够一定程度上获得发电机的机械惯性,但为提升短路电流需要通过撬棒电路将逆变器旁路,进而将电机退化到调相机运行模式,且该拓扑在控制上仍需要电网同步算法,同样会存在同步引发的稳定性问题。文献[22]提出一种基于双绕组异步电机(dua-winding induction machine, DWIM)的并网拓扑,但未给出具体的控制方法。本文在文献[22]的基础上,对并网拓扑进行了改进,并根据系统运行特性建立了 DWIM 控制绕组电流与并网功率的关系,设计了系统在不同工况下的控制策略。

1 基于 DWIM 的并网逆变系统

基于 DWIM 的并网拓扑主要由逆变器、DWIM 和励磁电

容构成,如图 1a 所示。DWIM 定子包含两套电气隔离的三相绕组,有功和无功功率通过电磁感应可以从一套绕组传递至另一套绕组,如图 1b 所示。一套定子绕组连接逆变器,称为控制绕组;另一套定子绕组通过并网开关连接电网,称为并网绕组。常规 DWIM 主要用作发电机或电动机,完成机电能量转换,而本系统中的 DWIM 转子不连接原动机或机械负载,主要用于两套定子绕组间电能到电能的变换,但频率变化的暂态过程中,转子动能能够自然参与阻尼响应,在电压暂态或发生短路故障时,并网绕组电流会暂态感应到转子回路,降低电磁时间常数,提升短路电流支撑能力。从功率传递的角度看,DWIM 类似一个变压器,两套定子绕组对应变压器的原副边,从而实现电气隔离、电压匹配的功能,从而省去了传统逆变器并网系统升压变压器。逆变器输出连接电机定子绕组,从而避免了并网逆变器交流滤波器的使用。在控制上,可以通过电机转速检测实现转子磁场定向矢量控制,从而避免了传统逆变器并网系统同步控制环节。



b. DWIM 在静止坐标系下的等效电路

图1 基于DWIM的并网逆变系统

Fig. 1 Grid-connected inverter system based on DWIM

与控制绕组连接的逆变器直流侧与传统并网逆变器直流侧类似,可由风电、光伏、储能单元或者它们的组合来提供能量。对控制绕组实施合适的控制策略,可以实现新能源或储能装备与电网之间的能量传递和并网绕组输出特性的控制。

并网绕组端口处并联有一组电容器,其作用是为 DWIM 提供励磁功率。励磁电容对控制没有影响,且即使没有励磁电容,逆变器或电网同样可以为 DWIM 提供励磁功率,不影响系统运行,但励磁电容的存在可以节省部分逆变器容量。值得一提的是,励磁电容的容值远大于传统并网逆变器 LC/LCL 滤波器中的电容容值,不存在其欠阻尼谐振问题。

DWIM 能够自主构建电压和频率,除了能够并网运行外,

还可以在电网出现故障的情况下离网带负载作为独立微电网运行,工作模式较为灵活。

虽然 DWIM 不可避免地产生一些能量损耗,但目前电机效率已达到较高水准,能量损耗较低。在本方案中 DWIM 具有升压功能,能够取代传统并网逆变器中的升压变压器, DWIM 和升压变压器均存在铜耗、铁耗和杂散损耗,所以系统总体仅增加了机械摩擦损耗。考虑到 DWIM 带来的众多优势,其增加的微小损耗是可接受的。实际上,调相机作为一种有效提升电网惯性的方案近年来已获得较多应用,调相机同样存在机械损耗,且不具有硬件复用性,硬件成本较高。因此,工程实践也证明了电机损耗的可接受性。

基于 DWIM 的并网逆变系统优势可总结如下:

1) 有效避免宽频振荡的产生,提升系统稳定性。基于 DWIM 的并网逆变系统与传统火力发电一样能量通过电机定子绕组送入电网,无需额外配置 LC 或 LCL 等交流滤波器,可以从根源上消除并网系统对电网阻抗的敏感性。DWIM 控制上通过转速检测实现磁链定向和功率解耦控制,避免了 PLL 或功率同步控制引发的振荡问题。

2) 引入旋转惯量,提升频率阻尼特性。因无机械负载 DWIM 与同步发电机类似能够在电网频率出现波动时转速会自然发生变化,从而通过惯性响应实现电网频率阻尼响应,且与调相机类似甚至可以通过附件飞轮增加其惯性阻尼能力。

3) 短路电流大,提升电网强度。电网发生短路故障时, DWIM 能够不依赖控制,自发地提供短路电流,与同步发电机的特性一致,能够增强对电网电压的支撑能力。且控制绕组与并网绕组相对静止,并网绕组中的暂态电流不会感应到控制绕组,从而不会危及逆变器的运行,即并网短路电流能力不受电力电子逆变器耐流能力限制。

4) 能够自主构建电压和频率。可在无常规电源提供电压和频率支撑的情况下运行,同时能够为系统中其他跟网型设备提供电压和频率信息,有利于提升电网对新能源的接纳能力。

5) 保留了电力电子变流器响应速度快的优势。传统同步发电机通过调整蒸汽轮机进汽量完成频率调整,而本方案中使用逆变器控制 DWIM,响应速度大幅提升,有望在 DWIM 利用旋转惯量维持电网频率的短时间内,逆变器完成调整以支持电网频率,增强电力系统应急反应能力。

6) 可实现升压变压器的功能。通过两套定子绕组匝比的设计,可实现电压等级的匹配,避免常规变流器并网方案对升压变压器的需求,且两套定子绕组之间同样具有电气隔离性。

2 基于双绕组异步电机的控制策略

2.1 双绕组异步电机数学模型

为实现变压功能, DWIM 两套定子绕组可设计为不同的

匝数,在建立其数学模型时需先将两套绕组的匝数归算到同一匝数下,归算方法与变压器绕组归算相同。匝数归算后的数学模型与普通双三相异步电机相同。采用双 d - q 建模方式,即利用坐标变换将两套绕组转化至同一个旋转坐标系下^[23],如图 2 所示。其中 δ 为两套定子绕组(ABC 和 UVW)空间分布角度差,由于相移 60° 的双绕组电机定子电流谐波含量更少^[24],为了提高并网电能质量,并考虑到升压功能设计的方便性,本文 δ 设计为 60° ; θ_1 和 θ_2 分别为两套绕组坐标变换的定向角。通过坐标变换可分别将绕组 ABC 和 UVW 对应的量值分别变换至 d_1 - q_1 和 d_2 - q_2 坐标系中。若取 $\theta_2 = \theta_1 - \delta$,则两个同步旋转坐标系重合。

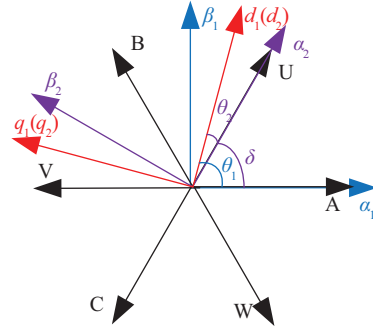


图 2 坐标系关系图

Fig. 2 Relationship diagram of coordinate system

在同步旋转坐标系下,电压方程为:

$$\begin{cases} u_{sd1} = R_s i_{sd1} + p\psi_{sd1} - \omega\psi_{sq1} \\ u_{sq1} = R_s i_{sq1} + p\psi_{sq1} + \omega\psi_{sd1} \\ u_{sd2} = R_s i_{sd2} + p\psi_{sd2} - \omega\psi_{sq2} \\ u_{sq2} = R_s i_{sq2} + p\psi_{sq2} + \omega\psi_{sd2} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega - \omega_r)\psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega - \omega_r)\psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd1} 、 u_{sd2} ——控制绕组和并网绕组的 d 轴电压, V; u_{sq1} 、 u_{sq2} ——控制绕组和并网绕组的 q 轴电压, V; u_{rd} 、 u_{rq} ——转子的 dq 轴电压, V, 采用鼠笼式异步电机, 因此转子的 dq 轴电压均为 0; R_s 、 R_r ——定子、转子电阻, Ω ; ψ_{sd1} 、 ψ_{sd2} 、 ψ_{rd} ——控制绕组、并网绕组和转子的 d 轴磁链, Wb; ψ_{sq1} 、 ψ_{sq2} 、 ψ_{rq} ——控制绕组、并网绕组和转子的 q 轴磁链, Wb; ω ——同步角频率, rad/s; ω_r ——转子角频率, rad/s; p ——微分算子。

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{sd1} = L_{ls} i_{sd1} + L_{lm} (i_{sd1} + i_{sd2}) + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \psi_{sq1} = L_{ls} i_{sq1} + L_{lm} (i_{sq1} + i_{sq2}) + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \\ \psi_{sd2} = L_{ls} i_{sd2} + L_{lm} (i_{sd1} + i_{sd2}) + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \psi_{sq2} = L_{ls} i_{sq2} + L_{lm} (i_{sq1} + i_{sq2}) + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \\ \psi_{rd} = L_{lr} i_{rd} + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \psi_{rq} = L_{lr} i_{rq} + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_{ls} 、 L_{lr} ——定子绕组和转子绕组漏感, H; L_{lm} ——两套定

子绕组之间的互漏感, H ; L_m ——定子绕组和转子绕组之间的互感, H ; i_{sd1} 、 i_{sd2} 、 i_{rd} ——控制绕组、并网绕组、转子绕组的 d 轴电流, A ; i_{sq1} 、 i_{sq2} 、 i_{rq} ——控制绕组、并网绕组、转子绕组的 q 轴电流, A 。

根据 DWIM 的电压方程和磁链方程, 可得到其在同步旋转坐标系下的等效电路, 如图 3 所示。

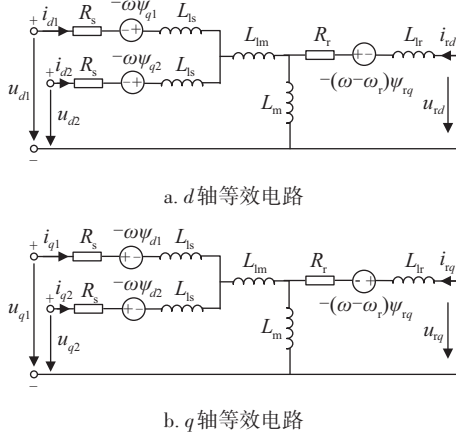


图 3 DWIM 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of DWIM

转矩方程为:

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} [(i_{sq1} + i_{sq2})\psi_{rd} - (i_{sd1} + i_{sd2})\psi_{rq}] \quad (3)$$

式中: T_e ——电磁转矩, $N \cdot m$; n_p ——磁极对数; $L_r = L_{lr} + L_m$ ——转子自感, H 。

忽略摩擦阻力, 运动方程为:

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

式中: T_L ——负载转矩, $N \cdot m$; J ——双绕组异步电机转子的转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

2.2 双绕组异步电机的矢量控制

通过逆变器对 DWIM 的控制绕组施加控制, 控制方式依然沿用电机控制中常用的矢量控制, 通过磁场定向将定子电流分解为励磁分量和转矩分量, 从而实现解耦控制。采用转子磁链定向, 即将旋转坐标系的 d 轴定位在转子磁链上。此时, d 轴转子磁链分量为转子全磁链, q 轴转子磁链分量为 0, 于是有:

$$\psi_{rd} = L_{lr} i_{rd} + L_m (i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) = \psi_r \quad (5)$$

$$\psi_{rq} = L_{lr} i_{rq} + L_m (i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) = 0 \quad (6)$$

DWIM 转子为鼠笼式结构, 因此 $u_{rd} = u_{rq} = 0$ 。将式(5)和式(6)代入式(1)中的转子电压方程可得:

$$R_r i_{rd} + p\psi_r = 0 \quad (7)$$

$$R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r)\psi_r = 0 \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可得:

$$i_{rd} = -\frac{p\psi_r}{R_r} \quad (9)$$

$$i_{rq} = -\frac{(\omega - \omega_r)\psi_r}{R_r} \quad (10)$$

将式(9)代入式(5), 可得:

$$\psi_r = \frac{L_m}{1 + T_r p} (i_{sd1} + i_{sd2}) \quad (11)$$

式中: $T_r = L_r / R_r$ ——转子时间常数。

将式(10)代入式(6), 可得:

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r \psi_r} (i_{sq1} + i_{sq2}) \quad (12)$$

式中: $\omega_{sl} = \omega - \omega_r$ ——转差角频率, rad/s 。

于是可求得同步角频率 $\omega = \omega_{sl} + \omega_r$ 。对同步角频率积分可得到同步旋转坐标系的定向角:

$$\theta_1 = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt \quad (13)$$

将式(5)和式(6)代入式(3), 可得:

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_r (i_{sq1} + i_{sq2}) \quad (14)$$

由式(11)和式(14)可看出, 转子磁链由两套绕组的 d 轴电流共同产生, 与 q 轴电流无关; 在转子磁链稳定时, 电磁转矩由两套绕组的 q 轴电流共同决定。这说明与常规三相异步电机矢量控制类似, 转子磁链定向使得定子电流中的励磁分量和转矩分了解耦, 进而可以通过 d 轴电流控制励磁, 通过 q 轴电流控制电机转矩。

2.3 并网功率控制

DWIM 的并网绕组与电网相连, 无法对其电流进行直接控制。因此需要建立控制绕组和并网绕组间的电流映射关系, 通过控制绕组电流间接控制并网绕组电流, 进而实现并网功率控制。

DWIM 工作时不带机械负载, 处于空载运行状态, 即 $T_e = T_L = 0$ 。根据式(14), 当电磁转矩为 0 时, 可以得到两套绕组 q 轴电流间关系为:

$$i_{sq1} = -i_{sq2} \quad (15)$$

因此, 稳态时可以通过对控制绕组 q 轴电流的控制达到对并网绕组 q 轴电流的间接控制。

空载时, DWIM 转差率为 0, 转子回路等效为开路状态, 转子电流为 0。因此, 总励磁电流 i_m 等于两套定子绕组的 d 轴电流 i_{sd1} 和 i_{sd2} 之和。因此,

$$i_{sd1} = i_m - i_{sd2} \quad (16)$$

式中: i_m ——总空载励磁电流, A 。

稳态时可将式(1)电压方程中的微分项忽略, 结合式(2), 并网绕组电压方程可表示为:

$$\begin{cases} u_{sd2} = R_s i_{sd2} - \omega L_{ls} i_{sq2} \\ u_{sq2} = R_s i_{sq2} + \omega [L_{ls} i_{sd2} + (L_{lm} + L_m)(i_{sd1} + i_{sd2})] \end{cases} \quad (17)$$

定子电阻和漏感远小于互感, 因此定子电阻和漏感上的压降可忽略, 式(17)可化简为:

$$\begin{cases} u_{sd2} = 0 \\ u_{sq2} = \omega(L_{lm} + L_m)(i_{sd1} + i_{sd2}) \end{cases} \quad (18)$$

由于并网绕组直接与电网连接,且由式(18)可知,并网绕组的 d 轴电压为 0,因此并网绕组 q 轴电压 u_{sq2} 等于电网电压,是一个相对固定的值。根据式(18),空载电流 $i_{sd1} + i_{sd2}$ (i_m) 也是一个定值。因此,由式(16)可知,可以通过控制绕组的 d 轴电流实现对并网绕组 d 轴电流的间接控制。根据瞬时功率计算理论,并网有功功率和无功功率可表示为:

$$\begin{cases} P = -\frac{3}{2} u_{sq2} i_{sq2} = \frac{3}{2} u_{sq2} i_{sq1} \\ Q = -\frac{3}{2} u_{sq2} i_{sd2} = \frac{3}{2} u_{sq2} (i_{sd1} - i_m) \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可看出,有功功率大小由并网绕组 q 轴电流决定,无功功率大小由并网绕组 d 轴电流决定。根据两套绕组电流之间的映射关系,可通过控制绕组 dq 轴电流间接控制并网绕组 dq 轴电流,分别对并网无功功率和有功功率进行控制。而 dq 轴电流又分别对应于励磁分量和转矩分量,这与同步发电机通过调整励磁和转速来控制并网无功和有功功率具有相似之处。

根据以上分析,可以将基于 DWIM 的逆变系统与同步发电机电机系统进行类比。如图 4 所示,DWIM 的 d 轴电流控制环节等效于同步发电机的励磁系统,DWIM 的 q 轴电流环节等效于同步发电机的原动机功率调节系统,并网绕组等效于同步发电机的定子绕组。当控制绕组 d 轴电流或同步发电机转子励磁电流增加至大于标准励磁电流,即空载励磁电流,并网绕组或同步发电机定子绕组会产生去磁性电流(去磁性电流在 DWIM 并网绕组中体现为负的 d 轴电流),其内电势幅值升高,并网无功功率增加。当控制绕组 q 轴电流增大,转

矩电流输入增大,并网绕组内电势频率升高,超前电网电压的功角增大,产生的阻力转矩增大(体现为并网绕组产生负的 q 轴电流),并网有功功率增加。DWIM 的 q 轴电流调过程等同于,同步发电机的原动机增加转矩输入,同步发电机内电势频率升高,功角增大,由于电网频率保持不变,同步发电机会产生阻力转矩以保持转速不变,并网有功功率增加。由以上对比可知,DWIM 具有类似同步发电机调磁调压、调速调频的控制特性。

2.4 电压源控制

当 DWIM 逆变系统工作在微电网或独立供电系统中时,需要具备独立构建电压和频率的能力,这就要求将 DWIM 的输出端口,即并网绕组输出特性控制为电压源。由式(18)可知,可以通过控制绕组励磁电流 i_{sd1} 调节并网绕组输出电压的幅值。控制绕组、并网绕组和转子绕组处在同一个气隙磁场内,因此三者的工作频率相同。将电机转速作为控制变量,通过控制绕组转矩电流 i_{sq1} 调节电机转速,进而调节并网绕组输出电压的频率。因此,利用控制绕组 dq 轴电流可以将并网绕组的输出特性控制为电压源。

并网绕组不带负载,处于开路状态,是系统离网运行的一种特殊情况,此时并网绕组电流为 0,并网绕组输出电压的幅值和频率依然可以分别通过控制绕组 dq 轴电流进行调节。

得益于类似同步发电机调磁调压、调速调频的特性,基于 DWIM 的逆变系统能够自主构建电压和频率,可实现离网独立运行。这对于极高比例新能源下电网的运行和微电网分布式新能源的利用具有重要意义,也有利于停电故障后电力系统的黑启动。

2.5 多工况控制策略

基于 DWIM 的逆变系统运行工况可以分为启动、投网、并网运行、离网运行等不同状态。在对 DWIM 工作特性分析的基础上,为满足系统在不同工况下的运行要求,设计了一套多工况控制策略,如图 5 所示。控制结构中主要包括转速电压环、功率环和电流内环,电流内环是外环控制目标实现的基础,转速电压外环和功率外环在不同工况下具有不同的作用。

在启动阶段,需让 DWIM 达到同步转速,通过转速控制环可以达到此目标。为了避免产生过大的启动电流,转速给定 n^* 设置为斜坡上升。在启动时电机转速较低,根据式(18),此时并网绕组电压幅值较小,若电压环给定 u_m^* 太大,控制绕组会产生过大的 d 轴电流,而过小会使 DWIM 励磁不充分,不能产生足够的启动转矩。因此,在启动阶段电压环给定不易确定。为了解决这一问题,在启动阶段断开电压外环,控制绕组 d 轴电流给定值 i_{d1}^* 设置为固定值。将图 5 中开关 K1 接通上侧支路,同时闭合开关 K4。待 DWIM 转速达到设定转速后,再切换至电压外环控制,K1 接通下侧电压

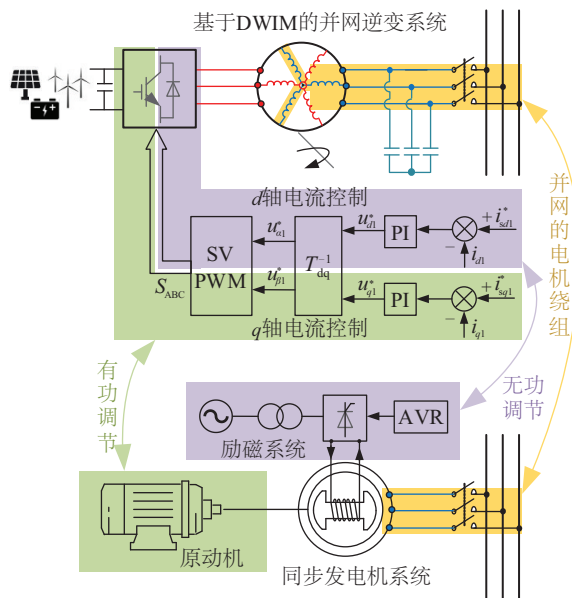
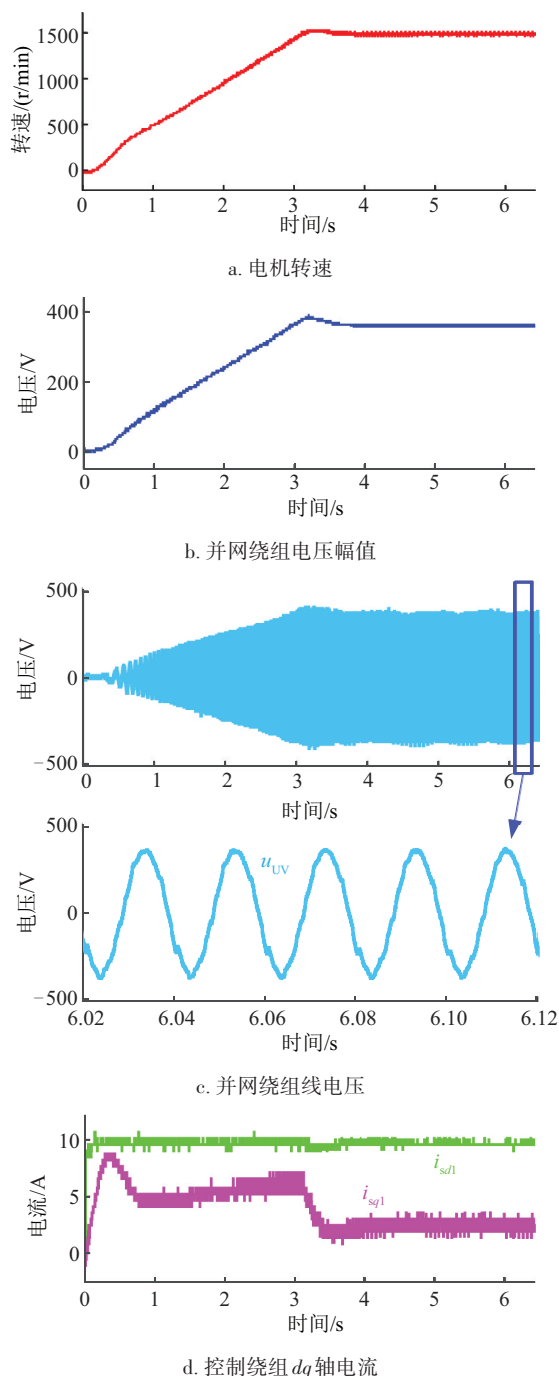


图4 双绕组异步电机逆变系统与同步发电机系统的类比

Fig. 4 Analogy between DWIM-based inverter system and synchronous generator system

启动实验的波形如图 8 所示,电机转速斜坡上升到同步转速,并网绕组电压幅值也随转速逐渐升高,控制绕组 d 轴电流 i_{sd1} 固定为 10 A, DWIM 能够平稳启动,没有产生明显电流冲击。

DWIM 启动完成后,调整控制绕组 d 轴电流 i_{sd1} 使并网绕组电压幅值与电网电压相同,然后待两者同步后,闭合开关 K6 将 DWIM 逆变系统投入电网,投网过程中的并网绕组的电压电流如图 9 所示。投网完成后,并网绕组电压被电网钳位,幅值与频率完全与电网电压一致。此时,由于实验样机功率较小,无法调控电网电压。但转速电压外环能够调控并



e. 控制绕组相电流

图 8 启动实验结果

Fig. 8 Results of startup experiment

网绕组内电势的幅值与频率,达到调节并网功率的效果。如图 10 所示,转速给定和电压幅值给定增加后,并网有功和无功也相应地增大。转速对应并网有功功率,电压幅值对应并网无功功率,类似于同步发电机调磁调压、调速调频的特性。由图 10c 可知,由于定子绕组电阻和漏感的存在,与同步发电机类似,有功功率和无功功率之间存在耦合,即有功功率变化时也会导致无功功率发生小幅变化,反之亦然。

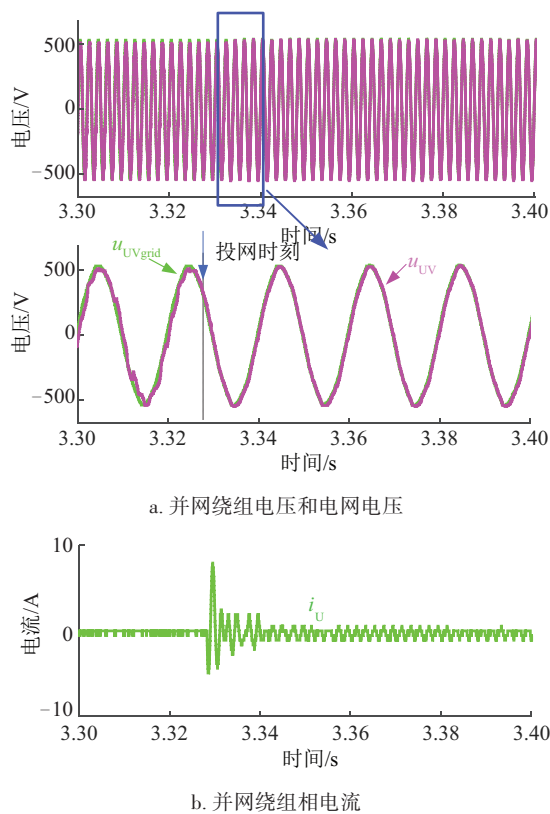


图 9 投网过程

Fig. 9 Process of integration into grid

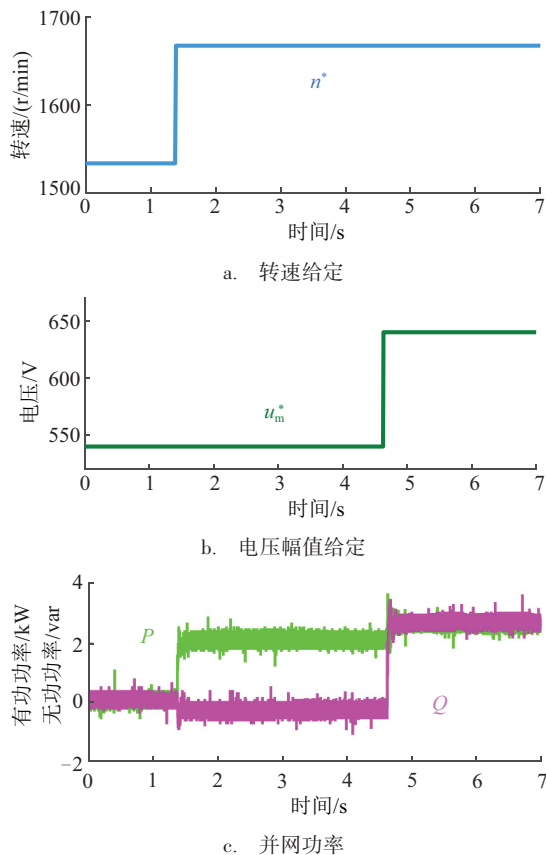


图10 电压源控制模式调控并网功率

Fig. 10 Voltage source control mode regulating grid-connected power

由电压源控制模式切换为功率源控制模式的过程如图11所示。由于仅控制外环不同,电流环未发生变化,所以相同并网功率下,并网绕组和控制绕组的电流在控制模式切换前后是相同的。这也说明两种控制模式的实现基础是相同的,都是利用了两套绕组电流之间的映射关系。由图11a可知,在2.2 s切换为功率源控制模式后,并网功率波动更小,功率控制更精准。完成切换后,在4.3 s处将有功给定增加至2.5 kW,无功给定增加至1 kW。功率环根据功率给定增加电流环给定,使控制绕组 dq 轴电流增加,根据2.3节分析得到的控制绕组与并网绕组电流存在的映射关系,控制绕组 dq 轴电流相应减小,根据式(19),并网功率相应增加。从图11a可以看出,并网有功和无功功率能够快速精准地跟踪给定,这对实现最大功率点跟踪提供了便利。为了反映两套定子绕组

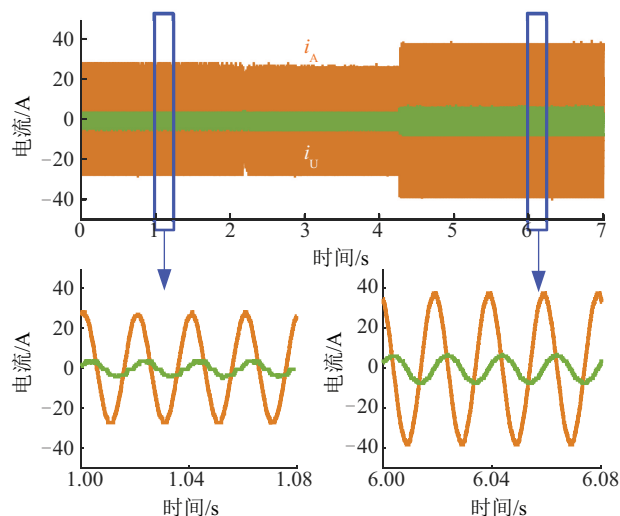
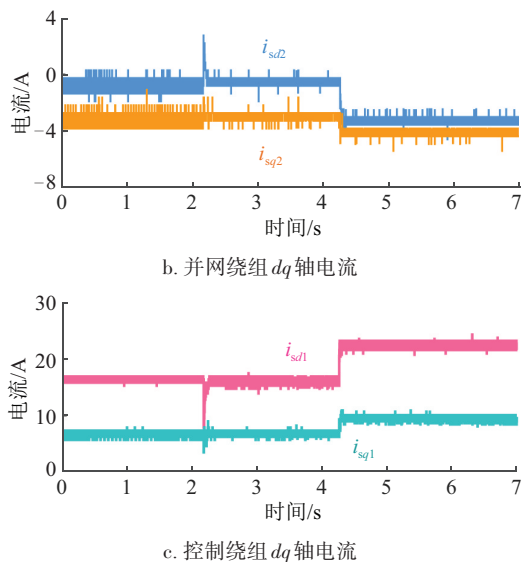
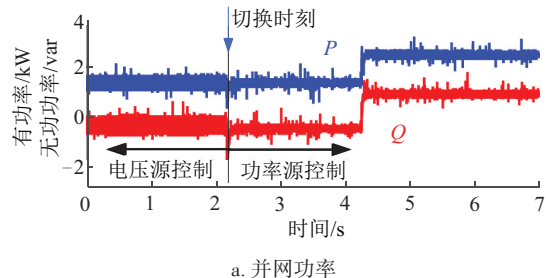
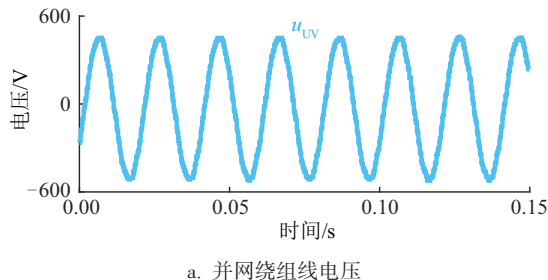


图11 电压源与功率源控制模式切换

Fig. 11 Switching between voltage source control mode and power source control mode

组匝数不同对电流大小的影响,图11b和图11c给出的是未经匝数归算的 dq 轴电流。由于并网绕组匝数是控制绕组的2倍,控制绕组 dq 轴电流变化幅度是并网绕组 dq 轴电流的2倍。

在离网状态下,并网绕组端口接 $30\ \Omega$ 的电阻负载,采用电压源控制模式,实验波形如图12所示。在转速电压环的



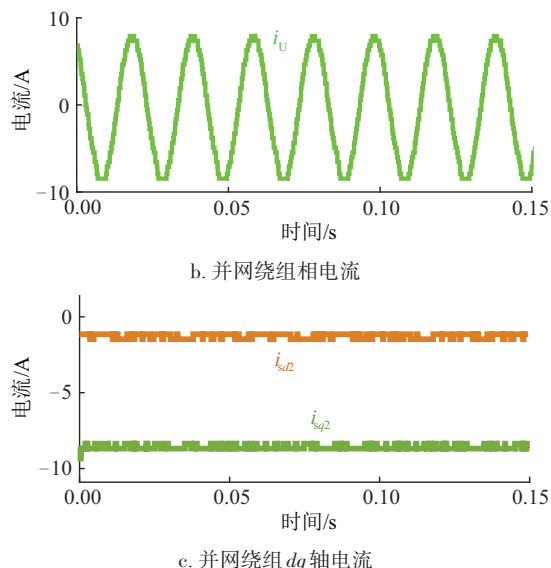


图 12 并网绕组带负载运行

Fig. 12 Grid-connected winding operation with load

控制下,并网绕组电压幅值和频率能够保持稳定。由于负载为阻性负载,消耗有功功率,所以并网绕组电流中包含高比例的 q 轴电流。

4 结 论

针对一种基于 DWIM 的并网逆变系统,在分析 DWIM 运行特性的基础上,针对不同的运行工况,设计一套多工况控制策略,并对其进行实验验证,可得出以下结论。

1)在转子磁链定向下,建立控制绕组与并网绕组 dq 轴电流之间的映射关系,使得利用控制绕组电流间接调控并网绕组电流具备实现基础。

2)推导出并网功率与两定子绕组 dq 轴电流之间的关系,据此可以利用控制绕组 dq 轴电流控制并网功率,实现功率源控制模式。同时,控制绕组 dq 轴电流分别为励磁和转矩电流分量,利用 DWIM 调磁调压、调速调频的特性可以实现电压源控制模式。

3)在启动阶段,转速斜坡上升和 d 轴电流固定可以保障平稳启动,不产生电流冲击;并网运行阶段,功率源控制模式和电压源控制模式能够进行切换,可根据实际需求选择不同的控制模式;采用电压源控制模式,不仅能够并网运行,也可以离网带负载运行。

[参考文献]

- [1] 姜齐荣,王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7200.
- JIANG Q R, WANG Y Z. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200.
- [2] 马燕峰,陈鑫,刘新元,等. 考虑新能源场站间相互作用的宽频振荡特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 563-573.
- MA Y F, CHEN X, LIU X Y, et al. Study on broadband oscillation characteristics considering interaction between new energy stations [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(1): 563-573.
- [3] SHAIR J, XIE X R, WANG L P, et al. Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2019, 99: 159-168.
- [4] MEEGAHAPOLA L G, BU S Q, WADDUWAGE D P, et al. Review on oscillatory stability in power grids with renewable energy sources: monitoring, analysis, and control using synchrophasor technology [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2021, 68(1): 519-531.
- [5] LIU B, LI Z, DONG X L, et al. Impedance modeling and controllers shaping effect analysis of PMSG wind turbines [J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2021, 9(2): 1465-1478.
- [6] XIE Z W, CHEN Y D, WU W H, et al. Stability enhancing voltage feed-forward inverter control method to reduce the effects of phase-locked loop and grid impedance [J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2021, 9(3): 3000-3009.
- [7] 李明. 高渗透率新能源发电并网逆变器阻抗自适应双模式控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- LI M. Research on impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverter for high permeability new energy generation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [8] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2019, 115: 109369.
- [9] 曹炜,张甜,傅业盛,等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 1-10.
- CAO W, ZHANG T, FU Y S, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser [J]. Automation of electric power systems, 2020, 44(3): 1-10.
- [10] 王振浩,陈诗伦,葛津铭,等. 计及新能源场站调频能

- 力的电力系统最小惯量评估方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 494-502.
- WANG Z H, CHEN S L, GE J M, et al. Minimum inertia evaluation method of power system considering frequency modulation capability of new energy stations [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(8): 494-502.
- [11] AL MASOOD N, YAN R F, KUMAR SAHA T. Cascading contingencies in a renewable dominated power system: risk of blackouts and its mitigation[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR, USA, 2018: 1-5.
- [12] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
- SUN H D, XU T, GUO Q, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [13] RICHARD L, NAHID-AL-MASOOD, SAHA T K. Deployment of synchronous condensers to improve system strength under high wind power penetration [C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta, GA, USA, 2020: 1-5.
- [14] 程珊珊, 王海鑫, 杨子豪, 等. 虚拟同步发电机对系统低频振荡的影响及抑制方法综述[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 119-129.
- CHENG S S, WANG H X, YANG Z H, et al. Overview of effect of virtual synchronous generators on low-frequency oscillation of power system and suppression methods [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(8): 119-129.
- [15] YANG M L, WANG Y, XIAO X Y, et al. A robust damping control for virtual synchronous generators based on energy reshaping [J]. *IEEE transactions on energy conversion*, 2023, 38(3): 2146-2159.
- [16] OBOREH-SNAPPS O, SHE B X, FAHAD S, et al. Virtual synchronous generator control using twin delayed deep deterministic policy gradient method [J]. *IEEE transactions on energy conversion*, 2024, 39(1): 214-228.
- [17] 杨效, 曾成碧, 苗虹, 等. 优化虚拟同步发电机惯量和阻尼的自适应控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 495-504.
- YANG X, ZENG C B, MIAO H, et al. Optimizing adaptive inertia and damping control strategy of virtual synchronous generator [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(11): 495-504.
- [18] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358.
- ZHAN C J, WU H, WANG X F, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [19] 李志强, 种芝艺, 黄金军. 快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6877-6885.
- LI Z Q, CHONG Z Y, HUANG J J. Test verification of dynamic reactive power characteristics of fast dynamic response synchronous condenser [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6877-6885.
- [20] WEI S M, ZHOU Y K, LI S, et al. A possible configuration with motor-generator pair for renewable energy integration [J]. *CSEE journal of power and energy systems*, 2017, 3(1): 93-100.
- [21] 马志豪, 孙丹, 刘纯, 等. 开绕组同步电机接口并网变流器功率控制及暂态支撑[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1609-1618.
- MA Z H, SUN D, LIU C, et al. Research on power control and transient support of grid-connected converter based on OW-WFSM interface [J]. *High voltage engineering*, 2025, 51(4): 1609-1618.
- [22] 杨淑英, 包芳泉, 张兴, 等. 一种基于旋转变压器的新能源并网拓扑、控制系统及方法: CN114552646A [P]. 2022-05-27.
- YANG S Y, BAO F Q, ZHANG X, et al. A new energy grid-connected topology, control system, and method based on the rotating transformer: CN114552646A [P]. 2022-05-27.
- [23] MUNOZ A R, LIPO T A. Dual stator winding induction machine drive [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2000, 36(5): 1369-1379.
- [24] GONZÁLEZ-PRIETO A, GONZÁLEZ-PRIETO I, YEPES A G, et al. On the advantages of symmetrical over asymmetrical multiphase AC drives with even phase number using direct controllers [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2022, 69(8): 7639-7650.

GRID-CONNECTED INVERTER SYSTEM BASED ON DUAL-WINDING INDUCTION MACHINE AND ITS MULTI-CONDITION CONTROL STRATEGY

Bao Fangquan, Yang Shuying, Xie Zhen, Zhang Xing

(School of Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A dual-winding induction machine based inverting system is proposed in this paper. The dual winding induction machine with two electrical interfaces is utilized as an energy conversion hub between the renewable energy source and the grid. It enhances the motor characteristics of the power system while completing the renewable energy integration. In order to make it valuable for application, this paper focuses on its control strategy. This paper sets out the analysis of the operating characteristics of the dual-winding induction machine. The analysis is used to design a set of multi-condition control strategies for different operating conditions. This strategy is intended to meet the control requirements of startup, integration into the grid, grid-connected operation and off-grid operation. The experimental results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: new energy; DC to AC inverters; asynchronous machine; dual-winding; grid-connected interface; multi-condition control strategy