

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230129

基于超级电容的新能源惯量-阻尼-电抗综合模拟控制方案

朱介北¹, 王云逸¹, 仲悟之², 俞露杰¹, 邓兆顺¹, 赵博文¹, 李斌¹

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 光伏、风电等新能源发电大规模接入电网逐步替代传统同步机, 导致电网惯量和阻尼水平不断下降, 威胁电网安全稳定运行。针对上述问题, 提出了一种基于超级电容的新能源惯量-阻尼-电抗综合模拟控制(composite inertia-damping-impedance emulation control, IDIE)方案。通过联立同步机转子运动方程和超级电容功率动态方程, 并结合同步机功率传输方程, 设计了通过控制超级电容有功功率以综合模拟同步机旋转质量、阻尼绕组和绕组电抗三者物理特性的核心算法。并利用小信号稳定性分析对方案关键参数进行优化。最后, 基于控制器硬件在环试验在各种暂态工况下对 IDIE 方案进行了评估。结果表明, IDIE 方案在灵活模拟同步机惯量的同时, 可通过配置优化模拟阻尼和模拟电抗, 保障频率稳定性, 支撑电网动态运行。

关键词: 新能源发电; 超级电容; 惯量模拟; 阻尼模拟; 电抗模拟

Composite inertia-damping-impedance emulation control scheme for renewable energy sources based on supercapacitor

ZHU Jiebei¹, WANG Yunyi¹, ZHONG Wuzhi², YU Lujie¹, DENG Zhaoshun¹, ZHAO Bowen¹, LI Bin¹

(1. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Photovoltaic, wind power and other renewable energy sources are connected to the power grid on a large scale, gradually replacing the traditional synchronous generators, resulting in a continuous decline in the inertia and damping level. This threatens the safe and stable operation of the grid. In response to this problem, a composite inertia-damping-impedance emulation control (IDIE) scheme based on a supercapacitor is proposed. By combining the swing equation, the power transmission equation of a synchronous generator and the power dynamic equation of a supercapacitor, a core algorithm is designed to control the active power of the supercapacitor to emulate the physical properties of the synchronous generator rotating mass, damping winding and winding impedance. The key parameters of the scheme are also optimized by small signal stability analysis. Finally, the IDIE scheme is evaluated in various transient conditions based on the controller-hardware-in-the-loop test. The results show that the IDIE scheme can ensure frequency stability and support the dynamic operation of the grid by configuring and optimizing simulated damping and impedance and flexibly simulating the inertia of the synchronous generator at the same time.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977143).

Key words: renewable energy sources; supercapacitor; inertia emulation; damping emulation; impedance emulation

0 引言

随着我国碳达峰、碳中和目标的提出, 光伏、风电等新能源发电正在新型电力系统中高速规模化发展应用^[1-2]。一方面, 新能源发电通过电力电子换

流器接入交流电网, 在传统控制下其功率输出与电网频率解耦, 不具备支撑主网频率稳定的同步机功率响应特性。不断提高的新能源渗透率可能导致主网故障下显著的频率变化率、频率偏移和振荡, 严重时甚至导致切机及停电事故^[3]。另一方面, 新能源并网逆变器可灵活、快速控制其功率输出, 在电网频率扰动时能够提供类似同步机动态特性的支撑效果, 有效缓解其并网带来的频率稳定问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977143); 国家电网公司科技项目资助(5100-202155018A0-0-00)

现有新能源频率支撑方案主要围绕模拟频率扰动过程中同步机的动态特性展开研究。然而,现有方案可模拟同步机惯量、阻尼和绕组电抗特性的一种或者两种,但缺乏对三种特性的综合模拟。基于电网频率变化率直接量化惯量功率的惯量模拟控制^[4]未涉及对同步机阻尼和电抗特性的模拟,易产生惯量功率的振荡问题^[5-7]。文献[8]仅提出了逆变器的电抗模拟方案,不具备惯量响应的调频能力。文献[9]提出了超级电容(本文简称“超容”)通过DC/DC换流器接入新能源直流系统的惯量模拟方案,但未对阻尼和电抗进行模拟。文献[10-11]虽然模拟了同步机惯量和阻尼特性,但采用电网频率和额定频率的线性差值来量化阻尼响应功率,实质上是一种快速调频特性,而非“任何”稳态时阻尼功率都为零的同步机阻尼特性^[12]。

此外,现有新能源频率支撑方案的控制回路设计虽可一定程度上模拟同步机的动态外特性,但在能量配置方面存在一定缺陷。虚拟同步控制^[13-14]利用同步机转子运动方程与电网同步,替代了传统的锁相环。然而,针对虚拟同步控制的研究大都忽略了新能源发电直流侧的动态,而假设新能源并网逆变器直流侧为无穷大容量的理想电压源。文献[15-16]针对适用于双馈风机和直驱风机的虚拟同步控制方案开展研究,分别通过将转子侧换流器控制改造为虚拟同步控制、将机侧和网侧换流器控制改造为直流电压控制和虚拟同步控制实现。文献[17-18]研究了适用于光伏发电的虚拟同步控制方案,该方案在光伏直流侧配置电池储能,对并网换流器采用虚拟同步控制,而对直流电压采用储能维持稳定。然而,上述方案设置并网逆变器为功率控制模式,而为了保障新能源交直流两侧功率的即时平衡,并网逆变器须运行在直流电压控制模式,而非功率控制模式。因此上述方案难以适用于实际新能源工程。通过将新能源运行在功率卸载模式^[19-20],可获得满足惯量和调频响应的功率备用,但会造成持续的弃风弃光问题,不具备经济性。文献[21]通过扩大并网逆变器直流侧电容实现了惯量响应的能量配置,但由于逆变器直流电压有较窄的运行范围,使得电容储能的利用率不高。

针对上述同步机特性综合模拟和能量配置两大问题,本文设计了一种基于超级电容的新能源惯量-阻尼-电抗综合模拟控制(composite inertia-damping-impedance emulation control, IDIE)方案,其主要特点为: 1) IDIE 方案同时实现对同步机惯量、阻尼和电抗三种特性的“综合”模拟; 2) IDIE 利用双向DC/DC变换器将超容接入新能源直流母线,以其更宽的压

变范围提高了对超容的能量利用率; 3) IDIE 无须改造新能源发电单元固有电路和控制,即插即用,易于应用在已投运新能源机组。

本文首先简要介绍了配置超容的新能源发电系统; 然后设计了IDIE方案,并给出了超容的容量配置及运行方法,通过小信号模型优化了IDIE的关键控制参数; 最后通过控制器硬件在环实验,在负荷投切和三相短时接地故障下分别验证和评估了IDIE方案。

1 接入超容的新能源发电系统

与蓄电池相比,超容在充放电速度、功率密度等方面具有显著优势,更适用于响应速度快、峰值功率高的惯量模拟技术^[22-24]。因此,本文选用超容作为惯量模拟技术的能量来源。以光伏为例,接入超容的新能源发电系统的拓扑结构如图1所示。光伏升压变换器一般采用最大功率跟踪控制模式,将捕获功率注入直流系统。为方便展示,本文将其前级部分表示为光伏电源。并网逆变器采用定直流电压控制,维持直流母线电压稳定和交直流功率的平衡。该系统的传统控制方案详见文献[25-26],此处不再赘述。超容通过双向DC/DC变换器接入新能源直流母线以实现双向的功率交换。下面将重点阐述所提基于超容的IDIE方案的设计。

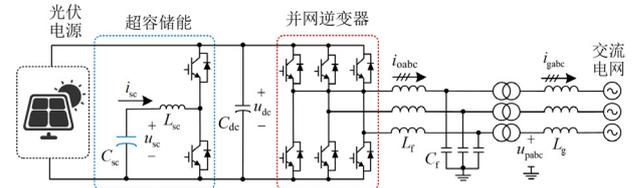


图1 接入超级电容的新能源发电系统拓扑

Fig. 1 Topology of supercapacitor-connected renewable energy source system

2 基于超容的惯量-阻尼-电抗综合模拟控制

2.1 IDIE 算法设计

本节通过联立同步机转子运动方程和超容功率动态方程,并结合同步机功率传输方程,设计了通过控制超容有功功率综合模拟同步机惯量、阻尼和电抗特性的IDIE算法,其推导如下。

同步机的转子运动方程可表示为

$$\frac{2H}{f_0} \frac{df}{dt} + \frac{D(f - f_g)}{f_0} = P_m - P_e = \Delta P_1 \quad (1)$$

式中: H 为同步机惯性时间常数,单位为s; D 为同步机阻尼系数; f_0 、 f 和 f_g 分别为同步机转子额定频率、转子即时频率和主网频率,单位为Hz; P_m 、

P_e 和 ΔP_1 分别为同步机的机械功率、电磁功率和转子转速变化时的交换功率, 单位为 p.u.。

超容的功率动态方程可表示为

$$\frac{C_{sc} u_{sc}}{S_0} \frac{du_{sc}}{dt} = \Delta P_2 \quad (2)$$

式中: C_{sc} 为超容的电容量, 单位为 F; u_{sc} 为超容电压, 单位为 V; S_0 为新能源发电系统逆变器的额定功率, 单位为 VA; ΔP_2 为超容交换功率, 单位为 p.u.。

联立式(1)与式(2), 使 $\Delta P_1 = \Delta P_2$, 可得

$$\frac{2H_v}{f_0} \frac{df_v}{dt} + \frac{D_v(f_v - f_g)}{f_0} = \frac{C_{sc} u_{sc}}{S_0} \frac{du_{sc}}{dt} \quad (3)$$

式中: H_v 为模拟惯性时间常数, 单位为 s; D_v 为模拟阻尼系数; f_v 为虚拟转子频率, 单位为 Hz。

对式(3)两侧积分可得

$$2H_v(f_v - f_0) + \frac{D_v(f_v - f_g)}{s} = \frac{u_{sc}^2 - u_{sc0}^2}{K} \quad (4)$$

式中: u_{sc0} 为超容的电压运行中性点, 单位为 V; $1/s$ 为积分算子; K 为常系数, $K = 2S_0 / (C_{sc} \times f_0)$ 。

式(4)将超容构建为一个虚拟转子频率为 f_v 、具备模拟惯量与阻尼特性功能的同步机。进一步地, 对虚拟转子频率 f_v 和主网频率 f_g 作差并积分, 可获得超容相对于主网的虚拟功角 δ_v 为

$$\delta_v = \frac{2\pi(f_v - f_g)}{s} \quad (5)$$

进一步地, 加入同步机绕组模拟电抗 X_v , 结合同步机绕组的功率传输特性, 可得超容有功功率 P_{sc1} 为

$$P_{sc1} = \frac{E_v U \sin \delta_v}{X_v} \approx \frac{\delta_v}{X_v} \quad (6)$$

式中: E_v 和 U 分别为超容模拟内电势和 PCC 电压, 单位为 p.u., E_v 和 U 可近似为 1 p.u.; δ_v 通常较小^[27], 故可近似为 $\sin \delta_v \approx \delta_v$ 。

综上, 式(4)一式(6)共同构成 IDIE 的核心算法, 下面将讨论如何将其应用于控制回路中。

2.2 IDIE 控制回路设计

基于式(4)一式(6), 本文设计了如图 2 所示的 IDIE 控制回路。首先, 超容的被控状态变量为 u_{sc}^2 , 经过根据式(4)设计的控制回路(如图 2 中红框所示), 实现了对同步机惯量和阻尼特性的模拟。其中, 输入为锁相环测量得到的主网频率 f_g , 其他参数均为已知量。进而, 基于式(5), 经过积分运算可得到虚拟功角 δ_v ; 进一步地, 基于式(6)实现了对同步机绕组电抗特性的模拟, 生成了超容的功率参考值

P_{sc}^* (如图 2 中蓝框所示)。最后, 通过功率控制器调节占空比, 生成相应的脉宽调制信号驱动双向 DC/DC 变换器的开关器件。

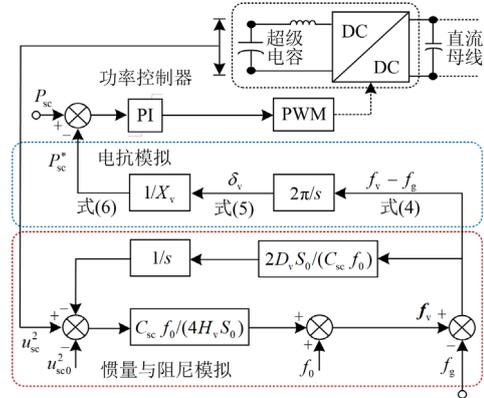


图 2 新能源电站惯量-阻尼-电抗综合模拟控制回路

Fig. 2 Control loops of composite inertia-damping-impedance emulation control for renewable energy source

本文设计的 IDIE 方案首先基于式(4)模拟了同步机的惯量和阻尼特性, 在此基础上进一步引入了基于式(6)的同步机绕组电抗特性模拟, 通过在频率扰动全过程中综合模拟同步机的惯量、阻尼和电抗特性, 保证了系统的稳定性。值得注意的是, IDIE 方案使用即时主网频率驱动控制回路, 避免了传统惯量模拟处理频率变化率 df_g/dt 环节可能引起的控制噪声。此外, IDIE 方案无须修改新能源发电系统原有的电路及控制, 实现了“即插即用”, 对改造已投运机组具有更好的适用性。

2.3 IDIE 超容电压的自主恢复

本节分析了超容电压 u_{sc} 和主网频率 f_g 之间的耦合特性。由于内环功率控制器的响应速度较快, 可认为超容功率输出 P_{sc} 快速跟踪其参考值 P_{sc}^* , 则超容的功率响应特性由 IDIE 控制回路主导。联立式(2)和式(4)一式(6), 消除变量 P_{sc} , 可得 u_{sc} 和 f_g 的关系为

$$\begin{cases} u_{sc} = \sqrt{\frac{4H_v S_0}{C_{sc} f_0} (G(s) f_g - f_0) + u_{sc0}^2} \\ G(s) = \frac{2\pi f_0}{2H_v X_v s^2 + D_v X_v s + 2\pi f_0} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $G(s)$ 为二阶惯性环节。由式(7)可知, 虽然 IDIE 方案的控制输出为超容的功率参考值, 但其实质上建立了超容电压 u_{sc} 和主网频率 f_g 的耦合关系: 当 f_g 运行在额定频率 f_0 时, u_{sc} 可被控制在超容的电压运行中性点 u_{sc0} ; 当 f_g 在扰动后达到新的稳态

$f_g \neq f_0$ 时, u_{sc} 亦可被控制到一个由式(7)确定的稳定值上。因此, IDIE 方案实现了超容电压的自主恢复。

2.4 超容配置及其电压运行中性点

为经济有效地实现 IDIE 的储能配置, 本节设计了 IDIE 方案的超容配置和中性点电压设置原则。由于主网频率的变化时间尺度远高于式(7)的二阶惯性环节 $G(s)$, 式(7)可简化为

$$u_{sc} = \sqrt{\frac{4H_{\max}S_0}{C_{sc}f_0}(f_g - f_0) + u_{sc0}^2} \quad (8)$$

观察式(8)可知, 配置的超容值过小会导致过大的超容电压偏移, 超出 DC/DC 变换器的调节范围; 配置的超容值过大则会导致不必要的投资成本和占地面积的增加。为得到最优的超容配置, 在明确 IDIE 方案最大模拟惯性时间常数 H_{\max} 、覆盖频率变化范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 和超容电压允许变化范围 $[u_{sc\min}, u_{sc\max}]$ 的条件下, 按照“主网频率到达覆盖频率范围最大值 f_{\max} (或最小值 f_{\min}) 时超容电压亦达到最大值 $u_{sc\max}$ (或最小值 $u_{sc\min}$)”的设计原则可得

$$\begin{cases} u_{sc\max} = \sqrt{\frac{4H_{\max}S_0}{C_{sc}f_0}(f_{\max} - f_0) + u_{sc0}^2} \\ u_{sc\min} = \sqrt{\frac{4H_{\max}S_0}{C_{sc}f_0}(f_{\min} - f_0) + u_{sc0}^2} \end{cases} \quad (9)$$

联立式(9)中两式, 消除 u_{sc0} 项, 可得最优超容值为

$$C_{sc} = \frac{4H_{\max}S_0(f_{\max} - f_{\min})}{f_0(u_{sc\max}^2 - u_{sc\min}^2)} \quad (10)$$

根据式(10)可绘制出不同超容电压允许变化范围 $[u_{sc\min}, u_{sc\max}]$ 内, 超容值 C_{sc} 、最大模拟惯性时间常数 H_{\max} 和最大覆盖频率偏移 $\Delta f_{\max} = f_{\max} - f_{\min}$ 三者之间的关系, 如图 3 所示。最大模拟惯性时间常数和最大覆盖频率偏差的数值越大, 要求超容的容值也越大, 以满足更多的能量需求。相比逆变器直流侧直接并联超容进行惯量模拟的方案^[21], 本文采用的双向 DC/DC 变换器拓宽了电压的可变范围, 更加充分地利用了超容能量, 可有效减小电容值, 具有更好的经济性。

联立式(9)中两式并消除 C_{sc} 项, 可得超容的电压运行中性点 u_{sc0} 为

$$u_{sc0} = \sqrt{\frac{f_{\max} - f_0}{f_{\max} - f_{\min}} u_{sc\min}^2 + \frac{f_0 - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} u_{sc\max}^2} \quad (11)$$

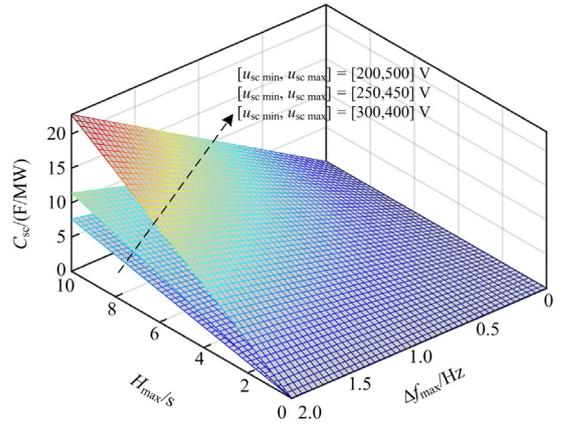


图 3 $C_{sc}-H_{\max}-\Delta f_{\max}$ 的三维关系图

Fig. 3 Three-dimensional relationship of $C_{sc}-H_{\max}-\Delta f_{\max}$

由式(9)可知, 在设置超容的电压运行中性点时, 须综合考虑覆盖频率变化范围和超容电压允许变化范围的影响, 根据需求灵活调整, 以满足上下调节时超容的能量裕度。

3 IDIE 方案小信号建模与参数优化

为优化 IDIE 关键参数, 本文以光伏发电系统为例, 搭建了图 1 和图 2 应用 IDIE 方案的光伏发电系统小信号模型 (small signal model, SSM), 如图 4 所示。详细参数见表 1 和表 2。具体建模过程参见文献^[25]。

对该系统的状态空间方程进行线性化, 有

$$\frac{d}{dt} \Delta X = A \Delta X + B \Delta U \quad (12)$$

式中: ΔX 为系统状态变量组成列向量的小扰动量; ΔU 为系统输入变量组成列向量的小扰动量; A 为系统状态矩阵; B 为系统输入矩阵。本文对状态空间方程的线性化采用了 Matlab/Simulink 平台中的 Linear Analysis Tool 工具箱。

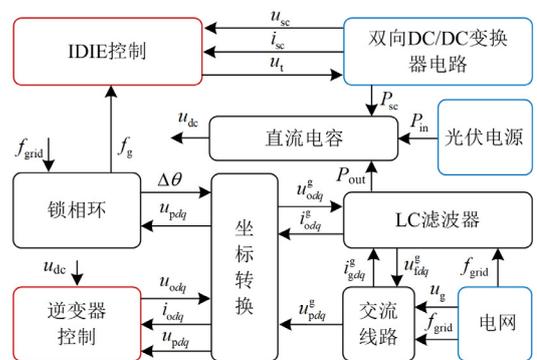


图 4 IDIE 方案下的光伏并网系统小信号模型结构

Fig. 4 SSM structure of PV system under proposed IDIE scheme

表 1 光伏并网系统参数

Table 1 Parameters of PV system

参数	数值
光伏并网逆变器额定功率 S_0 /MVA	1000
光伏出力 P_m /p.u.	0.7
直流侧电压 u_{dc0} /V	800
交流侧线电压/V	380
变压器电感 L_t /p.u.	0.06
变压器电阻 R_t /p.u.	0.002
额定频率 f_0 /Hz	50
交流侧滤波电感 L_f /p.u.	0.15
交流侧滤波电阻 R_f /p.u.	0.0015
交流侧滤波电容功率 Q_c /p.u.	0.1
交流侧滤波品质因数 r	50
超级电容 C_{sc} /(F/MW)	7.62
超容储能电感 L_{sc} /H	3.8×10^{-7}
超容储能电阻 R_{sc} / Ω	9.84×10^{-6}
允许频率变化范围/Hz	[49, 51]
最大模拟惯性时间常数 H_{max} /s	10
超容的运行电压中性点 u_{sc0} /V	380.8
允许超容电压变化范围/V	[200, 500]

表 2 系统控制参数

Table 2 Parameters of system controllers

类型	参数	数值
逆变器控制器	外环 PI 参数(k_{p1}, k_{i1})	(6, 60)
	内环 PI 参数(k_{p2}, k_{i2})	(1, 100)
	锁相环 PI 参数(k_{p3}, k_{i3})	(60, 1400)
双向 DC/DC 变换器控制器	内环 PI 参数(k_{p4}, k_{i4})	(2, 400)

为了验证所建 SSM 的准确度,对具备相同参数的系统电磁暂态(electromagnetic transient, EMT)模型与 SSM 的动态响应进行对比,如图 5 所示。在 $t = 1$ s 时,光伏出力由 0.7 p.u.阶跃至 0.72 p.u., SSM 和 EMT 的响应基本一致,验证了 SSM 的准确性。

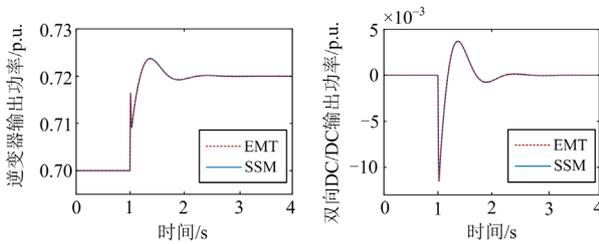


图 5 EMT 和 SSM 阶跃响应对比

Fig. 5 Step response comparisons between EMT and SSM

基于建立的 SSM,利用根轨迹方法分析 IDIE 方案的模拟阻尼系数 D_v 、电抗系数 X_v 和惯性时间常数 H_v 对系统稳定性的影响,并进行参数优化。

表 3 列出了系统所有特征值,其中具有较低阻尼比的特征根对 λ_8 、 λ_9 和 λ_{11} 、 λ_{12} 为影响系统稳定的主要模态。

表 3 系统特征根

Table 3 Eigenvalues of tested system

λ	特征根	阻尼比	频率/Hz
λ_1, λ_2	$-493.3 \pm j3371.2$	0.15	536.55
λ_3, λ_4	$-661.8 \pm j2864.6$	0.23	455.91
λ_5, λ_6	$-1718.6 \pm j407.2$	0.98	64.80
λ_7	-1217.6	1	0
λ_8, λ_9	$-0.1534 \pm j8.2372$	0.019	1.31
λ_{10}	-199.6	1	0
$\lambda_{11}, \lambda_{12}$	$-44.9 \pm j427.2$	0.10	68
λ_{13}	-10.2	1	0
λ_{14}	-25.03	1	0
λ_{15}	-1.004	1	0
λ_{16}	-1.07	1	0

如图 6(a)所示,随着 D_v 的增大, λ_8 、 λ_9 逐渐向远离虚轴的方向移动,阻尼比不断增大,系统稳定性增强。当阻尼比达到最优值 0.707 时,对应的 $D_v = 580$ 被辨识为最优的模拟阻尼系数。图 6(b)展示了交流电网频率阶跃为 -0.03 Hz 时,不同 D_v 值下逆变器的功率波形,可以看出,采用最优 D_v 在振荡幅度和收敛速度方面比其他参数具有更好的动态响应。

如图 7(a)所示,随着 X_v 的减小, λ_{11} 、 λ_{12} 迅速向右移动并越过虚轴至右半平面,系统失稳。当选取阻尼比为 0.707 时, $X_v = 0.11$ 为最优模拟电抗系数。类似地,图 7(b)验证了最优 X_v 可得到最好的功率动态响应。

如图 8(a)所示,当 D_v 和 X_v 分别取上述最优值时,随着 H_v 的增大, λ_8 、 λ_9 和 λ_{11} 、 λ_{12} 均逐渐向虚轴靠近,系统稳定性逐渐降低。但即使 H_v 取较大值 40 s,系统依然可以保持较好的稳定性。这说明通过附加 D_v 和 X_v 可使 H_v 的取值在稳定约束下具有更大的裕度。

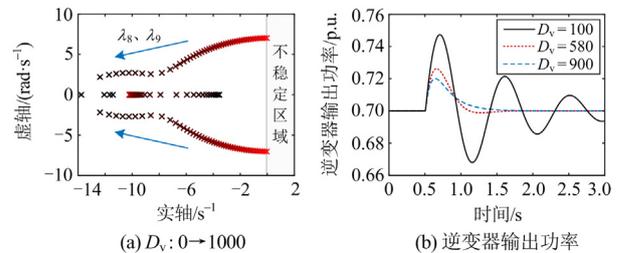


图 6 D_v 变化时系统主导特征根轨迹与动态响应

Fig. 6 Dominant eigenvalue locus and dynamic response under D_v variations

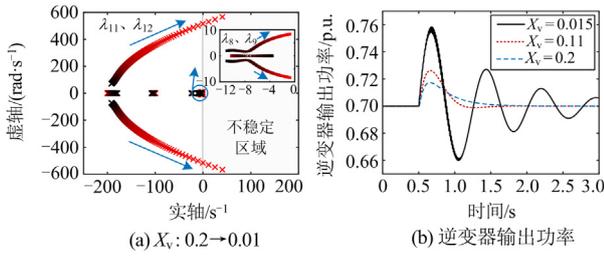


图 7 X_v 变化时系统主导特征根轨迹与动态响应
Fig. 7 Dominant eigenvalue loci and dynamic response under X_v variations

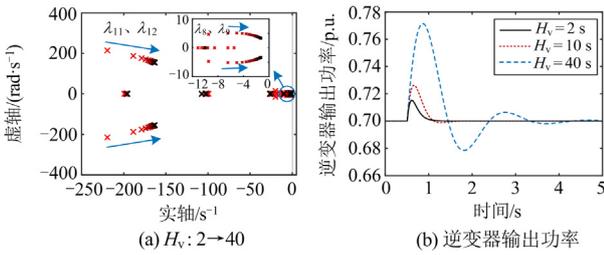


图 8 H_v 变化时系统主导特征根轨迹与动态响应
Fig. 8 Dominant eigenvalue loci and dynamic response with H_v variations

4 IDIE 方案的效果评估

为了评估 IDIE 方案的性能,本节基于图 9 所示的 IEEE39 节点系统^[28],进行了控制器硬件在环实验。实验平台包括:用于实现光伏电站控制的 dSPACE SCALAXIO 快速原型控制器和用于实现 IEEE39 节点系统实时仿真的 RT-LAB OP5600 实时仿真机。在该 IEEE39 节点系统中,母线 32、36 和 39 处连接的同步机由 3 个额定容量为 1000 MVA 的光伏电站替代,以构建新能源装机比例为 36% 的新能源高占比能源场景。可投切有功负荷 L1 为 314 MW,占总负荷的 5%。

本文分别在负荷阶跃增加、负荷阶跃减小和三相短时接地故障 3 种工况下对比以下 5 种控制方案。

1) 方案 1 为传统控制方案^[26]。

2) 方案 2 为仅具备模拟电抗的控制方案^[8],该方案中 $X_v = 0.15$ 。

3) 方案 3 为仅具备惯量模拟的控制方案^[9],该方案中 $H_v = 10$ s。

4) 方案 4 为同时具备惯量和阻尼模拟的控制方案^[11],该方案中 $H_v = 10$ s、 $D_v = 3$ 。

5) 本文设计的 IDIE 方案, $H_v = 10$ s、 $D_v = 580$ 、 $X_v = 0.11$ 。由式(10)计算得到超容值 $C_{sc} = 7.62$ F/MW。

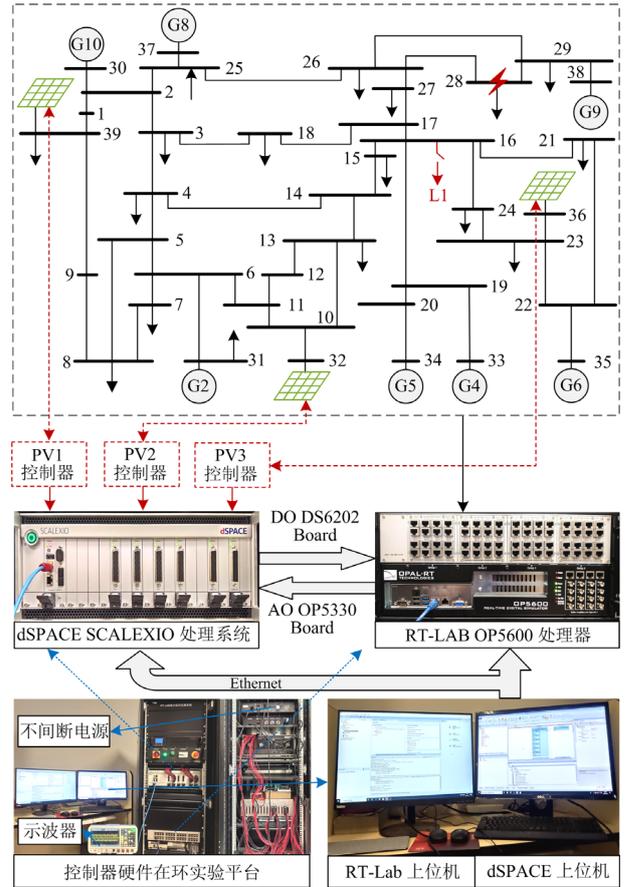


图 9 IEEE39 节点改进系统及其控制器硬件在环实验平台
Fig. 9 Modified IEEE39-bus system and controller-hardware-in-the-loop experimental platform

4.1 负荷阶跃增加工况

负荷 L1 在 $t = 1$ s 时接入电网,系统动态响应如图 10 所示。图 10(a)和图 10(b)验证了在 IDIE 方案、方案 3 和方案 4 下,主网频率的最低点和频率变化率相较于传统方案 1 和方案 2 显著减小。图 10(c)和图 10(d)表明,在具备惯量模拟的 IDIE 方案和方案 3 下,超容电压随主网频率的跌落相应地降低,有效提供了惯量响应功率,并且当主网频率调整到新的稳态时,超容电压也趋于稳定;然而方案 4 的阻尼响应功率取决于主网新稳态频率和其额定频率的差值,稳态频率的持续偏差导致超容持续放电,其电压无法稳定。由图 10(d)可见,方案 3 的惯量模拟方案由于没有考虑对同步机阻尼和电抗特性的模拟,因此在频率扰动初期,逆变器输出功率发生振荡。方案 4 由于缺乏电抗模拟,在负荷投入初期逆变器输出功率产生了不利振荡;相比之下, IDIE 方案实现了暂态功率快速、平滑的变化。图 10(e)展示了 5 种方案均未影响光伏发电的直流母线电压。图

10(f)表明, IDIE 方案在负荷阶跃增加的情况下更好地削减了同步机功率的暂态增量与振荡, 能够降低较大功率瞬变时同步机潜在的失步风险。而方案 3 和方案 4 的同步机功率均发生了短时振荡, 不利于系统的稳定运行。

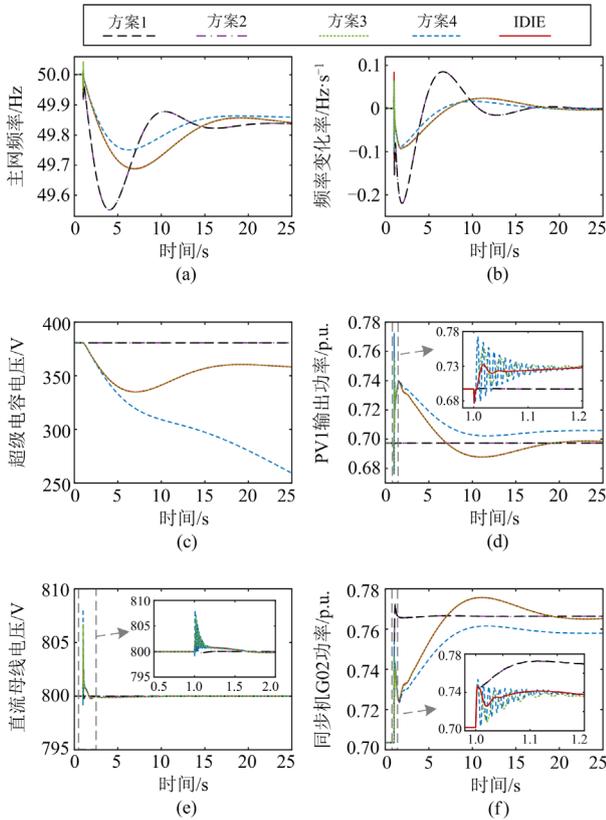


图 10 负荷 L1 接入后系统动态响应

Fig. 10 System dynamics at connection of load L1

4.2 负荷阶跃减小工况

负荷 L1 在 $t=1\text{s}$ 时切出电网, 系统动态响应如图 11 所示。从图 11(a)和图 11(b)可以看出, IDIE 方案、方案 3 和方案 4 均能明显地抑制主网频率偏差和频率变化率; 但是方案 4 中主网新稳态频率和额定频率的差值导致超容持续充电, 其电压持续上升, 如图 11(c)所示。与 IDIE 方案相比, 缺乏同步机阻尼模拟的方案 3 和方案 4 造成了逆变器输出功率的显著振荡, 如图 11(d)所示, 不利于系统暂态稳定。图 11(e)表明各方案均未显著影响光伏发电的直流母线电压。如图 11(f)所示, 与不具备惯量模拟的方案 1 和方案 2 相比, IDIE 方案显著减缓了同步机功率的变化; 而与方案 3 和方案 4 相比, IDIE 方案更为有效地抑制了同步机功率的振荡。

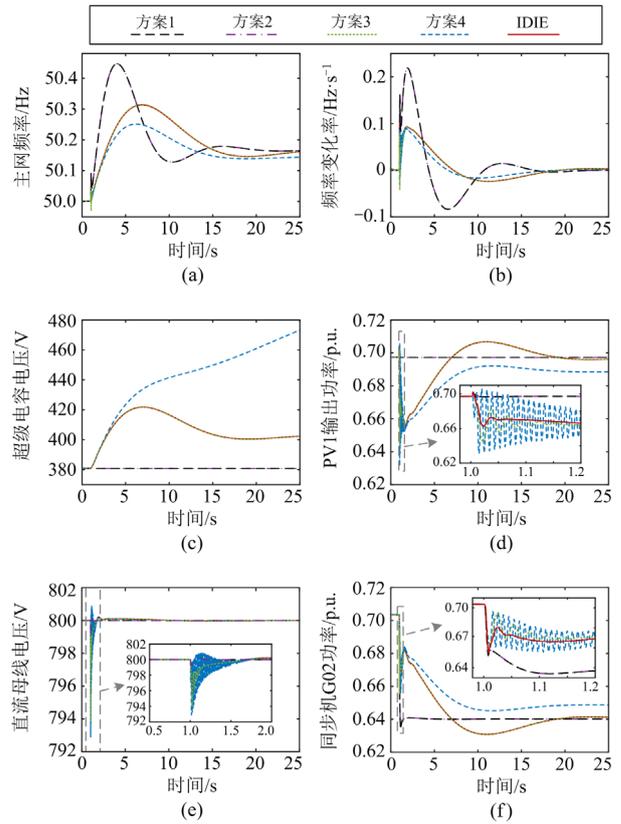
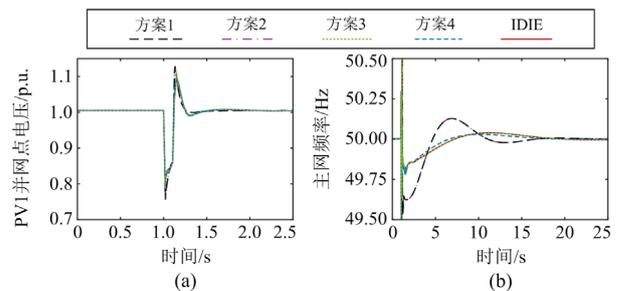


图 11 负荷 L1 切出后系统动态响应

Fig. 11 System dynamics at disconnection of load L1

4.3 三相短时接地故障工况

主网母线 28 在 $t=1\text{s}$ 时发生三相接地故障, 持续时间为 100ms , 系统动态响应如图 12 所示。该故障造成电压幅值骤降 25%, 如图 12(a)所示。图 12(b)和图 12(c)表明, IDIE 方案、方案 3 和方案 4 在故障恢复阶段均能有效减缓主网的频率偏移, 缩短故障恢复时间。图 12(d)表明, IDIE 方案在交流电网频率逐渐恢复到 50Hz 时, 可自主恢复超容电压到中性点电压。图 12(e)和图 12(f)表明, 与方案 3 和方案 4 相比, IDIE 方案可在故障恢复初期明显降低新能源并网逆变器功率和同步机功率的高频振荡, 有利于系统稳定。



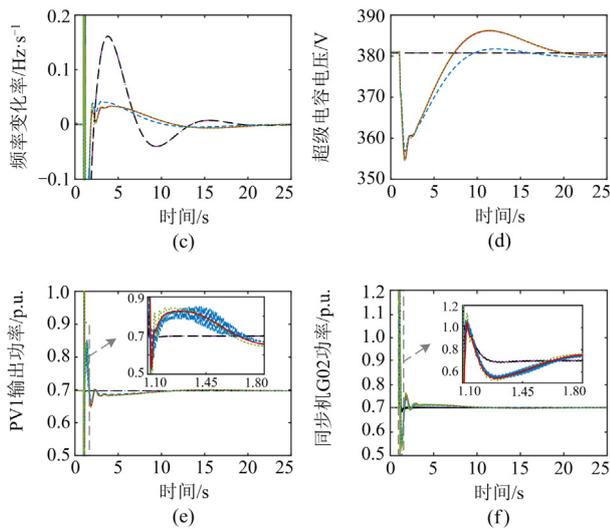


图 12 三相短时接地故障下系统动态响应

Fig. 12 System dynamics under temporary three-phase-to-ground contingency

5 结论

本文提出了一种基于超级电容的新能源惯量-阻尼-电抗综合模拟控制方案,同时实现了对同步机惯量、阻尼和电抗 3 种特性的“综合”模拟,具有以下特点:

1) IDIE 方案通过联立同步机转子运动方程、功率传输方程与超级电容功率动态方程,设计了新能源对同步机惯量、阻尼和电抗响应特性综合模拟的控制器,使用主网即时频率驱动控制器运行,避免使用易引起控制噪声的频率变化率信号;

2) IDIE 方案在灵活模拟同步机惯量的同时,可通过合理配置模拟阻尼和模拟电抗,综合提升主网频率和新能源功率的稳定性;

3) IDIE 方案设计了实现超级电容接入新能源直流系统的独立 DC/DC 变换器电路,不影响新能源固有控制及发电功率,实现了即插即用的技术优势,易于对已投运机组进行改造。

通过仿真验证了 IDIE 方案在负荷投切和三相短时接地故障工况下,支撑主网频率稳定,同时避免新能源功率振荡的有效性。随着未来新型电力系统中传统同步机逐步被低(无)惯量、欠(无)阻尼的新能源替代,本文所提 IDIE 方案在保障系统频率安全方面发挥着重要的作用。

参考文献

[1] LEE J, ZHAO F, DUTTON A, et al. Global wind report 2021[EB/OL]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council (GWEC), 2021[2021-06-05]. [https://gwec.net/wp-](https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf)

[content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf).

[2] PVPS Operating Agents, PVPS Executive Committee Members and Task 1 Experts. Photovoltaic power system programme annual report[EB/OL]. [2021-06-05] International Energy Agency IEA Photovoltaic Power Systems Programme, 2021. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf.

[3] 李东东, 孙雅茹, 徐波, 等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 54-61.

LI Dongdong, SUN Yaru, XU Bo, et al. Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high permeability power system considering frequency stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 54-61.

[4] DUCKWITZ D, FISCHER B. Modeling and design of df/dt-based inertia control for power converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1553-1564.

[5] 孙大卫, 刘辉, 高舜安, 等. 电流控制型虚拟同步发电机的小信号建模与稳定性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2983-2993.

SUN Dawei, LIU Hui, GAO Shun'an, et al. Small-signal modeling and stability analysis of current-controlled virtual synchronous generators[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2983-2993.

[6] SHANG L, DONG X, LIU C, et al. Fast grid frequency and voltage control of battery energy storage system based on the amplitude-phase-locked-loop[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 13(2): 941-953.

[7] FU R, WANG X, ZHANG Y, et al. Inertial and primary frequency response of PLL synchronized VSC interfaced energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2998-3013.

[8] WANG X, LI Y W, BLAABJERG F, et al. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(12): 7019-7037.

[9] 朱介北, 史美琦, 张利, 等. 基于超级电容的海上风电柔直送出系统协调惯量支撑策略[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2938-2952.

ZHU Jiebei, SHI Meiqi, ZHANG Li, et al. Supercapacitor-based coordinated inertia support strategy for offshore wind farms integration via VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2938-2952.

[10] PENG Q, YANG Y, LIU T, et al. Coordination of virtual inertia control and frequency damping in PV systems for optimal frequency support[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 305-316.

- [11] ZHU J, WANG X, ZHAO J, et al. Inertia emulation and fast frequency-droop control strategy of a point-to-point VSC-HVDC transmission system for asynchronous grid interconnection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6530-6543.
- [12] YU Y, CHAUDHARY S K, TINAJERO G D A, et al. A reference-feedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7566-7571.
- [13] GUO L, XU Z, JIN N, et al. A weighted voltage model predictive control method for a virtual synchronous generator with enhanced parameter robustness[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 482-492.
- [14] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 76-85.
DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 76-85.
- [15] WANG S, HU J, YUAN X. Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 932-944.
- [16] 王东泽, 孙海顺, 黄碧月, 等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3282-3294.
WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biyue, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-source-type PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3282-3294.
- [17] ZHANG X, GAO Q, GUO Z, et al. Coordinated control strategy for a PV-storage grid-connected system based on a virtual synchronous generator[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 51-59.
- [18] 高建瑞, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑储能充放电功率限制的并网光储虚拟同步机控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 134-141.
GAO Jianrui, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Control of grid-connected PV-battery virtual synchronous machine considering battery charging/discharging power limit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 134-141.
- [19] 杜永安, 杜丽艳, 徐岩. 光伏发电接入柔直互联区域调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 1-9.
DU Yong'an, DU Liyan, XU Yan. Frequency regulation for PV generation connected to an interconnection area by VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 1-9.
- [20] 胡家欣, 胥国毅, 毕天姝, 等. 减载风电机组变速变桨协调频率控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3656-3663.
HU Jiaxin, XU Guoyi, BI Tianshu, et al. A strategy of frequency control for deloaded wind turbine generator based on coordination between rotor speed and pitch angle[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3656-3663.
- [21] ZHU J, HU J, HUNG W, et al. Synthetic inertia control strategy for doubly fed induction generator wind turbine generators using lithium-ion supercapacitors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 33(2): 773-783.
- [22] FANG J, LI H, TANG Y, et al. On the inertia of future more-electronics power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7(4): 2130-2146.
- [23] QUAN X, YU R, ZHAO X, et al. Photovoltaic synchronous generator: architecture and control strategy for a grid-forming PV energy system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(2): 936-948.
- [24] FANG J, TANG Y, LI H, et al. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(4): 2820-2824.
- [25] LIANG J, FAN H, DENG Z, et al. Generic synthetic inertia scheme for voltage source inverters[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(3): 696-705.
- [26] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [27] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [28] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-08-08

作者简介:

朱介北(1987—), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电系统、新能源发电系统、电网规划与调度等; E-mail: jiebei.zhu@tju.edu.cn

王云逸(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电并网技术; E-mail: 467431151@qq.com

俞露杰(1990—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为海上风电并网技术、直流输电、换流器控制等。E-mail: lujie.yu@outlook.com

(编辑 许威)