

基于匹配控制的构网型变换器小扰动稳定性综述

李奕瞳¹, 艾 诚¹, 覃 瑶¹, 刘 腾², 喻松涛², 刘进军¹

(1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 西安 710049;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘 要: 匹配控制(或被称为惯性同步控制、直流电压同步控制等)是一种适用于光伏发电、风力发电、静止无功补偿器和柔性直流输电等直流侧为非理想直流电压源场景的构网型控制方法。现有研究中针对匹配控制更加着重于分析其与同步发电机转子惯性之间的匹配模拟, 通常缺少对其同步阻尼及同步小扰动稳定机理的深入分析。因此, 首先对匹配控制的国内外研究发展历程进行了简要梳理, 然后提出了基于反馈与前馈的同步阻尼分类方式, 并分别从直流侧附加电阻、网侧附加控制阻尼和机侧附加控制阻尼 3 个层面, 对当前研究中各种匹配控制方法及其小扰动同步稳定机理进行了对比分析和归纳总结, 最后再针对匹配控制所适用的光伏发电、风力发电、静止无功补偿器和柔性直流输电等 4 种典型应用场景进行了案例分析, 有助于提高对匹配控制方法在实践应用中的价值认知和能力特性认知。

关键词: 构网型变换器; 匹配控制; 惯性同步控制; 同步阻尼; 小扰动稳定性

An Overview of Small-disturbance Stability of Grid-forming Converters Based on Matching Control

LI Yitong¹, AI Cheng¹, QIN Yao¹, LIU Teng², YU Songtao², LIU Jinjun¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Matching control (also known as inertia synchronization control, DC voltage synchronization control, etc.) is one of grid-forming control methods that can be applied to photovoltaic power generation, wind power generation, static reactive power compensation and HVDC power transmission where the DC side is not an ideal DC source. The existing researches focus more on the imitation between the matching control and the rotor inertia of synchronous generators, and usually lack the in-depth analysis of the synchronous damping and small-disturbance synchronous stability mechanism. Therefore, this paper firstly reviews the research and development history of matching control, and then proposes the classification of synchronous damping based on feedback and feedforward controls. Meanwhile, from the aspects of DC-side additional resistance, the grid-side additional damping control, and the machine-side additional damping control, this paper compares and summarizes the various matching control methods as well as their small-disturbance synchronous stability mechanism. Finally, four typical application scenarios of matching control, including photovoltaic power generation, wind power generation, static var generation, and HVDC power transmission, are analyzed in this paper, which is also helpful to enhance the value cognition and characteristic ability cognition of matching control method in practical applications.

Key words: grid-forming converters; matching control; inertia synchronization control; synchronous damping; small-disturbance stability

0 引言

近日国家发展改革委制定发布了《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》^[1], 代表

着我国在绿色能源转型与新型电力系统构建中的有序进行和持续推进。根据国家能源局最新发布的全国电力工业统计数据显示^[2], 截至到 2024 年 7 月底, 全国累计太阳能发电装机容量约 7.4 亿 kW, 同比增长 49.8%; 风电装机容量约 4.7 亿 kW, 同比增长 19.8%。伴随着能源电力系统转型的不断推进, 光伏、风电等新能源发电场站正在逐步大规模接入到

基金资助项目: 国家自然科学基金(52307222)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52307222).

电网之中^[3-5], 而作为其中核心并网接口的电力电子变换器也在深刻影响着当前电力系统的稳定运行机理与动态响应特性, 并带来了迥异于传统电力系统的难题与挑战^[6-8]。

依据控制架构与运行机理的不同, 当前并网变换器类型的主要分类为: 跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)^[9-12]。跟网型变换器整体对外部电网呈现出电流源特性与“跟随”特性, 难以提供主动电压支撑, 且依赖于外电网电压进行并网同步, 在电网强度较弱或线路阻抗较大时无法稳定运行^[13-15]。而构网型变换器则对外主要呈现出电压源特性, 依靠自身有功潮流实现并网同步^[16], 具备多时间尺度下的主动电压构建与频率支撑的能力, 是实现新型电力系统安全稳定运行的重要保证之一, 也是目前研究的热点方向与前沿问题^[17-19]。

针对构网型变换器, 国内外研究学者分别于不同时期在不同场景下提出了相应的构网型控制方法, 大致可归纳分类为有功-频率下垂控制^[20-21]、虚拟同步机控制^[22-23]、匹配控制^[24-25](在国内也被常称为惯性同步控制或直流电容同步控制)和虚拟振荡器控制^[26-27]。针对上述 4 种构网型变换器的控制架构、稳定机理和发展挑战等方面的分析讨论已在众多研究综述中有所总结^[10,17,28-29]。值得注意, 匹配控制作为上面 4 类构网控制中重点考虑了变换器直流母线电压动态的控制方法, 可广泛适用于多种无额外储能的非理想恒压直流母线场景, 例如光伏发电、风力发电、静止无功补偿、柔性直流输电等等, 具有重要的研究价值与应用潜力^[30-35]。然而, 现有研究综述中针对匹配控制的分析讨论大多都比较宏观, 对其同步阻尼及小扰动同步稳定性方面缺少深入细致的理论分析与归纳总结。此外, 根据作者调研, 当前研究领域中还未有着重针对匹配控制的研究综述出现。因此本文将针对基于匹配控制的构网型变换器小扰动稳定性展开综述研究, 本文的核心创新点在于针对国内研究中常常被忽略的匹配控制的同步阻尼作用进行深入研究分析, 通过归纳对比提出了反馈与前馈同步阻尼的分类方式, 并从多个维度对现有匹配控制及其阻尼控制方法进行了合理的归纳总结, 有助于揭示匹配控制的同步稳定机理, 同时对匹配控制方法的应用案例进行了统一梳理分析。

本文的内容章节安排是: 首先第 1 章针对国内外匹配控制的研究发展历程进行了梳理归纳; 其次第 2 章简要总结了匹配控制的基本同步机理并建立

有功闭环小信号系统模型, 验证无阻尼情况下的失稳现象; 然后第 3 章提出了反馈与前馈同步阻尼的分类方式, 依次从直流侧附加电阻、网侧附加控制和机侧附加控制 3 个层面对现有匹配控制方法及其同步稳定机理进行了合理的归纳总结; 紧接着第 4 章再对匹配控制所适用的光伏发电、风力发电、静止无功补偿和柔直输电 4 种典型应用场景进行了案例分析; 最后第 5 章进行了全文总结及未来展望。

1 国内外研究发展历程

1.1 国内研究发展历程

国内上海交通大学、浙江大学、华中科技大学等研究团队早在 2017 年左右就开始了关于利用直流侧电压动态进行变换器并网同步控制方面的理论研究^[25,36-37]。匹配控制在国内也常被称为惯性同步控制, 其核心出发点在于将直流侧电容控制等效为同步机的转子惯性, 从而实现类似于同步机的功率自同步控制, 匹配控制的典型系统拓扑架构及控制框图大致如图 1 中所示。该方法最开始是被提出应用于双馈风电机组的网侧变换器之中以实现无需锁相环的自同步并网以及弱网条件下的稳定运行^[25]。该研究也还一并提出一种电力系统镇定器的控制架构(后来也被称作网侧致稳控制), 以增加系统电气阻尼。在同一时间这种同步控制方法也被提出应用于风场-柔直系统领域^[36], 当柔直系统两端换流站同时采用相同架构的惯性同步控制时, 除了也能实现自同步并网外还能自发实现风电机组对网侧交流系统的惯性响应, 无需另加额外的功率控制支路或通讯环节, 从而提高风电场对外部电网的适应性和支撑作用。随后在 2021 年惯性同步控制也被自然而然的提出应用于全功率风电机组的电压源控制架构之中^[31,38], 此时网侧变换器采用基于直流电容电压的惯性同步控制方式, 机侧变换器采用最大功率点跟踪下的矢量电流控制方法。为了进一步利用风机风轮内部储存的转动动能以增强网侧变换器对外的惯量响应能力, 惯性传递控制也被提出加入到机侧变换器控制之中^[31], 与此同时该文献也建立了全功率风电机组的全系统小信号控制框图, 通过复功率系数法从阻尼特性角度揭示了附加惯量控制可能会降低系统稳定裕度, 并在此基础上进一步提出了机侧与网侧的致稳控制策略以提高风电场弱网稳定运行能力。文献[32]和[39]也分别就基于惯性同步控制的构网型直驱风电场以及再经电网换相高压直流输电

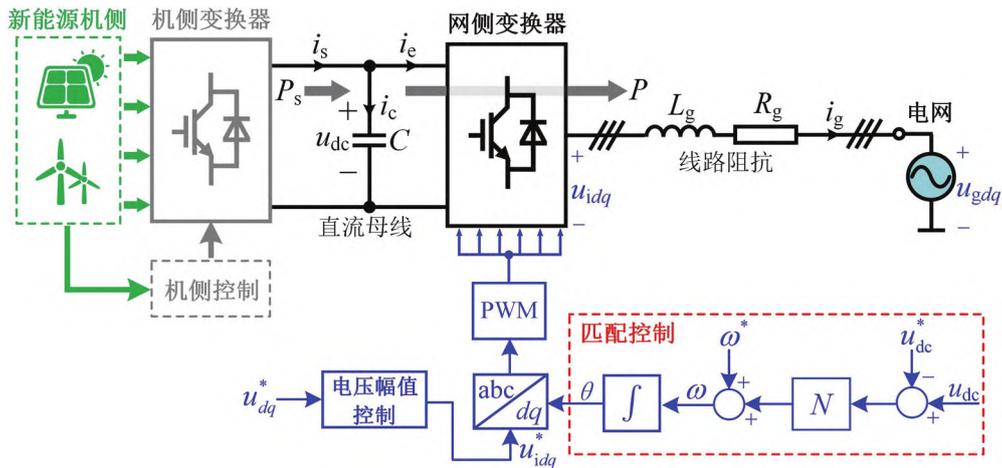


图1 基于匹配控制的典型系统拓扑架构及控制框图

Fig.1 Typical system architecture and control block diagram based on matching control

外送系统的次同步稳定性进行了相关振荡机理分析。文献[32]建立了构网型直驱风电场全系统小信号模型,并借助阻尼转矩法分析其次同步振荡机理,并探讨了电网强度、风机台数和无功控制参数对系统次同步模态阻尼特性的影响。文献[39]则是通过状态空间的特征值法与阻尼重构法对其系统的次同步振荡和阻尼机理展开了研究分析。文献[33]对匹配控制的电压支撑和频率跟随能力进行了讨论研究,实现了对现有构网型控制方法理论定义的扩展补充,并分析了虚拟前馈阻尼大小对系统小信号同步模态的影响。除小扰动层面的稳定性分析之外,针对使用惯性同步控制的风电机组系统的暂态故障问题,文献[40]也提出了对应的故障穿越控制与保护方法。文献[34]针对基于匹配控制的柔性直流输电系统,提出了构网传递支撑的概念,实现了柔直系统单端故障后的暂态支撑能力提升。

1.2 国外研究发展历程

在差不多同一时间段内,国外苏黎世联邦理工学院的研究团队也曾研究过利用直流电容储能与其自身电压动态,来模拟同步发电机的转子旋转动态,从而实现电力电子变换器与同步发电机在物理结构上的关联匹配^[24,41]。该方法在国外常被简称为 matching control,中文直译为匹配控制,寓意为变换器与同步机之间的模拟匹配。匹配控制仅需采样直流电压及经过一次积分后即可得到变换器同步相位,天然具有低时延、快响应的特点^[24]。当机侧电流输出受到直流电压的比例反馈控制时,在此条件下文献[42]通过对比匹配控制与虚拟同步机控制下变换器的序阻抗差异,验证了两种控制方式具有等

价的小信号动态特性。而当此比例反馈控制变为比例-微分形式的反馈控制时,系统的等效阻尼与惯性也将有所提升^[35]。针对直流电容电压的匹配控制,丹麦奥尔堡大学的研究团队指出在前级直流恒功率输入的情况下,匹配控制会出现由于小信号闭环控制系统的相位裕度不足而难以保证系统稳定的现象^[30],并进一步提出了引入 q 轴电压的附加同步控制支路以增强系统同步稳定性^[43]。文献[44]也提出了通过引入带有陷波滤波器的附加有功同步控制支路,在阻尼同步振荡的同时增大参数的选取范围。而在近两年,陆续也有国外学者将匹配控制思想应用于模块化多电平柔直系统领域,并增加额外的有功控制支路,以此同时实现直流侧和交流侧的主动电压构建,这类方法又被其称作双端构网控制^[45-46]。

2 匹配控制同步机理分析

2.1 转子惯性匹配模拟

在图1所示的匹配控制系统拓扑及控制框图中,网侧变换器通过直流电容匹配控制实现并网同步,其中上标带“*”号表示常数参考值,滤波电路部分也统一归算到感性线路阻抗之中。匹配控制的核心思想在于利用直流侧电容电压对有功潮流的动态变化匹配模拟同步机转子的旋转动态,从而实现类似于同步机的自功率同步并网。直流侧电容电压 u_{dc} 表征的是交直流两侧有功功率的动态变化,因此 u_{dc} 关于有功功率 $P_s - P$ 的动态方程和变换器输出相位 θ 可表示为:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{P_s - P}{u_{dc}}, \theta = \int N u_{dc} dt \quad (1)$$

式中: C 为直流电容容值大小; P_s 表示前级机侧向网侧输出的瞬时有功功率; P 表示经过电容后的有功功率; N 表示从直流电压 u_{dc} 到交流频率 ω 的匹配系数。而在同步发电机中, 若忽略阻尼绕组作用, 同步机转子的旋转动态和相位输出方程也可对应表示为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P_m - P}{\omega_r}, \theta = \int N_p \omega_r dt \quad (2)$$

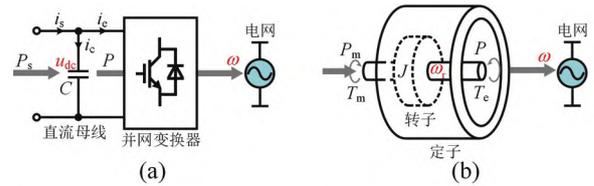
式中: J 表示转子惯性大小; P_m 和 P 分别表示原动机输入功率和同步机电磁输出功率; N_p 表示电机极对数大小, 即从机械旋转角速度 ω_r 到三相交流电频率 ω 的比例系数。

对比式(1)和式(2)相似的表达式可以看出, 在匹配控制方式下变换器直流侧电容 C 可等价于同步机转子惯性 J ^[25,37], 直流电容电压 u_{dc} 等价于转子机械旋转角速度 ω_r , 匹配系数 N 可等价于同步机极对数 N_p ^[33], 值得注意的是此时匹配系数 N 可以自由调整, 而极对数 N_r 受电机本体物理结构限制通常为固定整数。最后关于匹配控制下并网变换器与传统同步发电机的同步参数对比总结如图 2 中所示。

匹配控制利用直流电压动态进行并网同步, 而正如式(1)所示的电压动态将直接由电容两侧有功功率差值所决定, 所以匹配控制在本质上也可以归类为基于有功功率的同步控制中的一类, 只是此时其有功功率的含义并非如虚拟同步机控制或下垂控制一般仅仅指代交流侧有功功率, 而是包含和考虑了直流侧有功功率在内的。目前现有文献中关于匹配控制系统的电压幅值控制包括有: 开环电压控制^[33]、恒无功控制^[36]、引入直流电压 u_{dc} 的网侧致稳控制^[31]、虚拟导纳控制^[44]等等。相比于其他同样基于有功功率的同步控制, 匹配控制系统的电压/无功控制方法其实并无太多特殊之处, 相关控制策略和机理分析理论上都可沿用。只是值得注意的是, 相比于其它构网型控制, 在匹配控制系统中可以额外将直流电压 u_{dc} 作为输入量引入到电压幅值控制中(例如后文的网侧致稳控制), 此时 u_{dc} 将同时影响相位同步控制和电压幅值控制, 其所带来的同步阻尼作用将在后续章节进行阐述。与此同时, 为了重点突出对匹配控制的同步机理论和简化非必要的分析流程, 本文所提到的变换器电压幅值控制策略, 在未特殊说明情况下均默认采用电压开环控制。

2.2 无阻尼同步稳定性分析

仅通过采样直流电容电压进行并网同步是最



并网变换器		同步发电机	
直流滤波电容	C	转子机械惯性	J
电容同步阻尼	—	转子阻尼绕组	D
直流侧电流	i	转子机械转矩	T
直流电容电压	u_{dc}	转子旋转角速度	ω_r
匹配比例系数	N	电机极对数	N_p
有功功率	P	有功功率	P

(c)

图 2 匹配控制下变换器与同步发电机的同步参数对比总结

Fig.2 Comparison and summary of synchronization parameters between matching control converters and synchronous generators

简单也最为人熟知的匹配控制方法, 但值得注意的是, 此时变换器仅仅模拟了同步机转子的旋转动态, 而没有进一步模拟同步机阻尼绕组的同步阻尼作用。目前熟知的是当同步发电机的阻尼作用不足时, 系统的小信号稳定性将无法得到保证, 此时系统将容易发生低频振荡和轴系扭振问题, 进而可能导致转子轴系损坏和引发系统失稳切除。因此从直观上就可以进行类比推测, 对于同样缺少同步阻尼作用或阻尼作用不足的匹配控制并网变换器系统(同理包括后文将会提到的各种阻尼方式下的匹配控制系统), 其小信号稳定性也会同样较差, 阻尼不足时系统都会产生右半平面极点导致发散振荡失稳。与此同时, 在现有电力系统大规模接入可再生新能源的背景之下, 新能源机侧变换器往往采用最大功率点跟踪控制以追求新能源的最大出力。若再无直流储能装置以稳定直流母线电压, 即直流母线电压完全由网侧变换器控制稳定时, 则直流母线电压波动将对机侧功率输出基本不产生影响, 此时机侧输出在一定时间尺度内对于后级网侧变换器而言可等价于恒功率源输出。因此在后续的推导中将会先把机侧变换器输出等效为新能源发电中最常见的恒功率源输出以简化系统分析, 然后针对无阻尼匹配控制建立小信号闭环系统模型以研究其小扰动同步稳定性。

对式(1)在稳态工作点处进行小信号线性化, 可得到小扰动情况下有功功率之差 $\Delta P_s - \Delta P$ 到直流电压 Δu_{dc} 的传递函数为:

$$\frac{\Delta u_{dc}}{\Delta P_s - \Delta P} = \frac{1}{U_{dc0} C_s} \quad (3)$$

式中：下标“0”表示对应物理量的静态工作点，前缀“Δ”表示对应物理量的小扰动信号。此时变换器的输出频率扰动Δω为：

$$\Delta \omega = N \Delta u_{dc} \quad (4)$$

为表征交流系统的同步动态，在变换器桥臂中点处定义的同步旋转坐标系为dq坐标系，在外电网与线路阻抗连接处定义的同步旋转坐标系为DQ坐标系。稳态时变换器运行在逆变状态，此时重新将dq同步坐标系超前于DQ同步坐标系的稳态相位差定义为θ，即等价于潮流功角大小。在系统稳态时根据同步旋转坐标系的投影关系，变换器桥臂中点处的开环电压输出幅值u_{idq}在DQ坐标系中的表达式为：

$$\begin{bmatrix} u_{iD} \\ u_{iQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{id} \\ u_{iq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在开环电压控制中，u_{idq}=u_{idq}^{*}为固定常值不含扰动项，因此对式(5)进行小信号线性化后可得：

$$G_{U0} = \frac{\Delta u_{iDQ}}{\Delta \theta} = \begin{bmatrix} -U_{id0} \sin \theta_0 - U_{iq0} \cos \theta_0 \\ U_{id0} \cos \theta_0 - U_{iq0} \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中相位差扰动Δθ可以被进一步表示为：

$$\Delta \theta = \frac{1}{s} \Delta \omega \quad (7)$$

在DQ坐标系中关于线路电感电流i_{gDQ}的关系式为：

$$\begin{bmatrix} u_{iD} - u_{gD} \\ u_{iQ} - u_{gQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_g + R_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & sL_g + R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gD} \\ i_{gQ} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中无穷网的电压幅值u_{gDQ}和频率默认保持不变，小信号分析时可认为无穷网短路，因此对上式(8)进行小信号线性化后可得在DQ同步坐标系中，线路电感电流Δi_{gDQ}与变换器输出电压幅值Δu_{iDQ}的关系式为：

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{gD} \\ \Delta i_{gQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_g + R_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & sL_g + R_g \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_{iD} \\ \Delta u_{iQ} \end{bmatrix} \quad (9)$$

忽略变换器自身器件损耗，此时经过直流电容后的有功功率P即为变换器桥臂中点直接对外输出的有功功率，其小扰动表达式可直接列写为：

$$\Delta P = \begin{bmatrix} U_{iD0} \\ U_{iQ0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta i_{gD} \\ \Delta i_{gQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{gD0} \\ I_{gQ0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta u_{iD} \\ \Delta u_{iQ} \end{bmatrix} \quad (10)$$

联立式(9)和式(10)可解得从输出电压扰动Δu_{iDQ}到功率扰动ΔP的传递函数表达式G_{PU}为：

$$G_{PU} = \frac{\Delta P}{\Delta u_{iDQ}} = \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} U_{iD0} \\ U_{iQ0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} sL_g + R_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & sL_g + R_g \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{gD0} \\ I_{gQ0} \end{bmatrix}^T$$

再令

$$G_{P0} = G_{PU} G_{U0} \quad (12)$$

从而最终可以建立如图3(b)所示的匹配控制下单机并网变换器关于有功功率的小信号闭环系统框图，同时为方便对比分析，图3(a)也给出了经典的同步发电机有功闭环系统框图（同时该框图也等价于虚拟同步机控制或带低通滤波器的有功-频率下垂控制的构网型变换器^[10,22,33]）。

此时匹配控制系统的闭环传递函数G_c可以表示为：

$$G_c = \frac{T_c}{1 + T_c} \quad (13)$$

其中T_c为开环传递函数：

$$T_c = \frac{N}{s^2 C U_{dc0}} G_{P0} \quad (14)$$

对比图3(a)和(b)可明显看出在该种匹配控制方式下的变换器系统缺少类似于同步机中的反馈同步阻尼D。并且从框图中可以明显发现，由于在开环传递函数中存在有两个纯积分环节(分别表征的是直流电容电压动态与频率积分动态)，这将直接为系统带来-180°的相位偏移，极易导致系统相位裕度不足^[29]，尤其是当系统中不存在超前控制环节时，此时相位裕度不足将导致系统小信号不稳定。为验证上述分析，图4绘制了当仅改变匹配系数N时，无阻尼匹配控制闭环系统极点的变化趋势，其中闭环极点可通过求解闭环传函G_c得到。从图4中闭环极

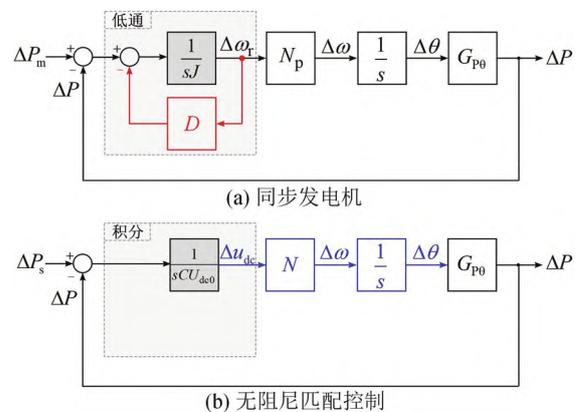


图3 有功功率小信号闭环系统框图对比

Fig.3 Closed-loop system block diagram comparison about active power

点的变化情况可以看出, 无论如何调节匹配系数 N , 系统总存在一对低频的右半平面极点^[43-44]。再联系与图 3 中同步发电机的框图对比分析, 可以初步判断上述小信号不稳定是由于系统缺少同步阻尼所导致的。

与此同时值得注意的是, 尽管存在上述失稳问题, 国内研究中在提及匹配控制时常常只提到如何具体实现同步控制, 而没有充分认识或忽略了同步阻尼的问题。之所以以往在仅使用直流电容匹配控制时也能保证系统小信号稳定, 是由于在不同条件下或者通过其它控制支路恰好为匹配控制等效提供了同步阻尼作用, 但是其自身却没有察觉。关于现有研究中是如何为网侧变换器匹配控制提供同步阻尼作用的讨论分析以及归纳总结将在下一章节进行重点展开。

3 匹配控制阻尼机理分析

最简单基本的匹配控制无阻尼低频振荡问题已在上一章中进行了证明论述, 现有研究中所提到的其它类型的匹配控制方法其实都可以看做是在原来最简单的匹配控制的基础上进行了不同维度的优化改进, 进而为系统提供了等效阻尼作用, 避免了无阻尼振荡失稳问题。因此本章将从直流侧附加实际电阻、网侧附加控制和机侧同步稳定性提升 3 个层面, 对系统的控制架构和阻尼机理进行对比分析和归纳总结。

3.1 附加直流侧电阻阻尼

3.1.1 并联直流电阻

在国外苏黎世联邦理工学院团队的研究中, 为了等效模拟变换器开关损耗, 常常会在直流电容处并联有实际电阻^[24,35], 具体如图 5(a)中框图所示。当直流电容处存在并联电阻 R_p 时, 匹配控制所代表的同步机理将会显著变化。此时直流侧有功功率的动态方程将变为:

$$P_s - P = C \frac{du_{dc}}{dt} u_{dc} + \frac{u_{dc}^2}{R_p} \quad (15)$$

式中: R_p 表示并联电阻阻值大小。对上式进行小信号线性化可重新得到有功功率差 $\Delta P_s - \Delta P$ 到直流电压 Δu_{dc} 的传递函数为:

$$\frac{\Delta u_{dc}}{\Delta P_s - \Delta P} = \frac{1}{CU_{dc0}s + \frac{2U_{dc0}}{R_p}} \quad (16)$$

其闭环系统框图如图 6(a)中所示, 此时可以发

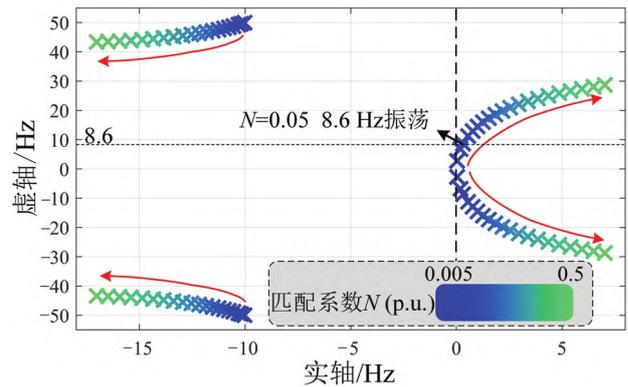


图 4 闭环系统极点随匹配系数 N 改变时的变化趋势
Fig.4 The variation trend of closed-loop system poles with the change of matching coefficient N

现原有的代表转子惯性的纯积分环节变成了同时代表惯性与反馈阻尼共存的低通滤波环节, 与图 3(a)中的同步发电机闭环框图类似, 此时其等价的同步阻尼系数为 $2U_{dc0}/R_p$ 。附加直流侧并联电阻将为匹配控制引入负反馈形式的同步阻尼支路, 该反馈支路将一个纯积分环节变成低通滤波环节, 其所提供的相位将由原来的恒 -90° 变成从 0° 到 -90° 的过渡变化, 导致系统框图中将只存在一个纯积分环节, 因此闭环系统在截止频率处的相位裕度将得到显著的改善提高。

图 7 中所示为无阻尼情况下和附加直流侧并联电阻后的匹配控制单机并网系统小扰动波形对比, 在 0.2 s 时, 网侧无穷电网频率跌落产生小扰动, 无阻尼匹配控制下的变换器输出频率逐步发散振荡, 而附加直流并联电阻后的系统则能稳定过渡, 证明了附加直流侧并联电阻的同步阻尼效果。与此同时, 无阻尼发散振荡的振荡频率为 8.6 Hz, 与图 4 中极点图的极点频率结果一致, 交叉验证了前述理论推导的正确性。通过上述结论其实也可进一步推测, 在实际系统运行中, 变换器自身功率损耗所等价的并联电阻也能为匹配控制带来一定的反馈同步阻尼效果。

3.1.2 串联直流电阻

除了在直流电容处并联电阻外, 与之对偶的则是在直流电容处串联电阻, 此时其所代表的同步机理和阻尼效果较之前又会发生明显改变。如图 5(b)中所示为在直流电容处串联实际电阻 R_s , 此时直流侧功率平衡动态方程将改写为:

$$P_s - P = C \frac{du_c}{dt} u_c + (C \frac{du_c}{dt})^2 R_s \quad (17)$$

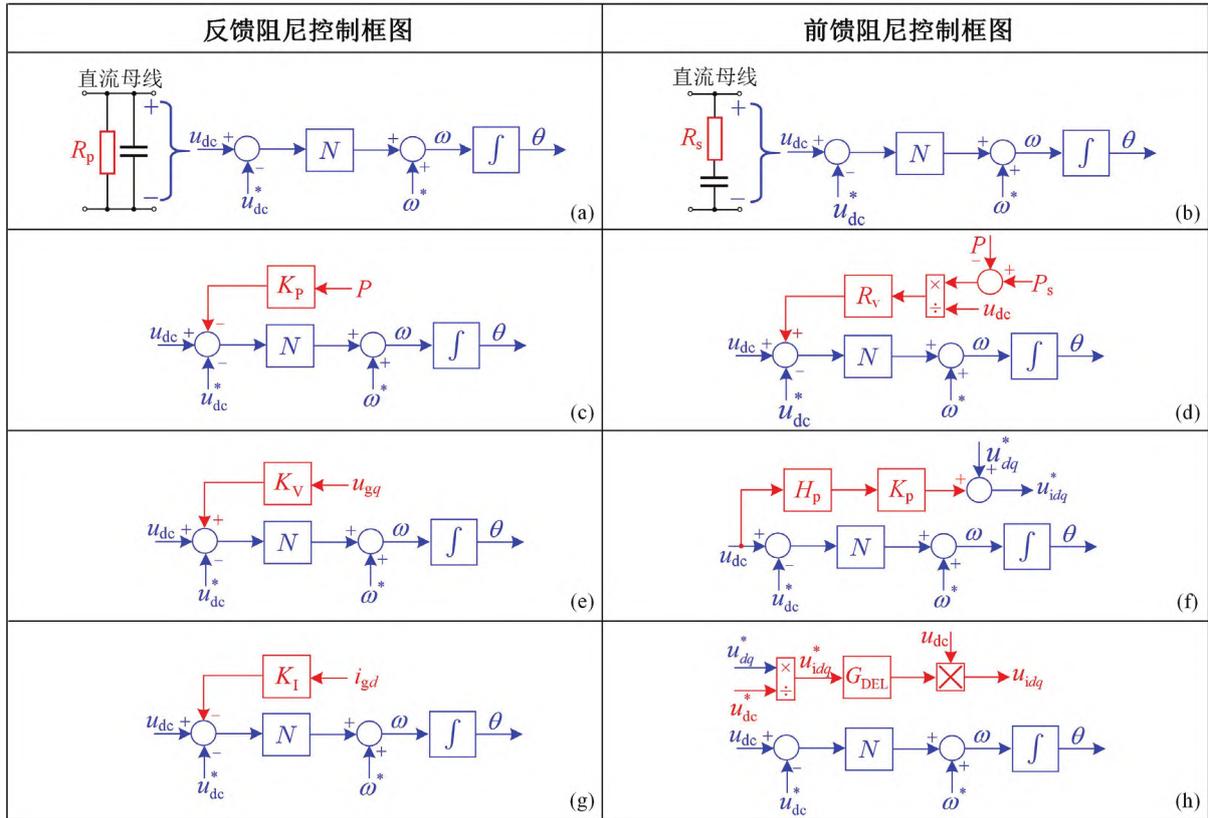


图5 反馈与前馈同步阻尼的匹配控制框图

Fig.5 Matching control block diagram of feedback and feedforward synchronous damping

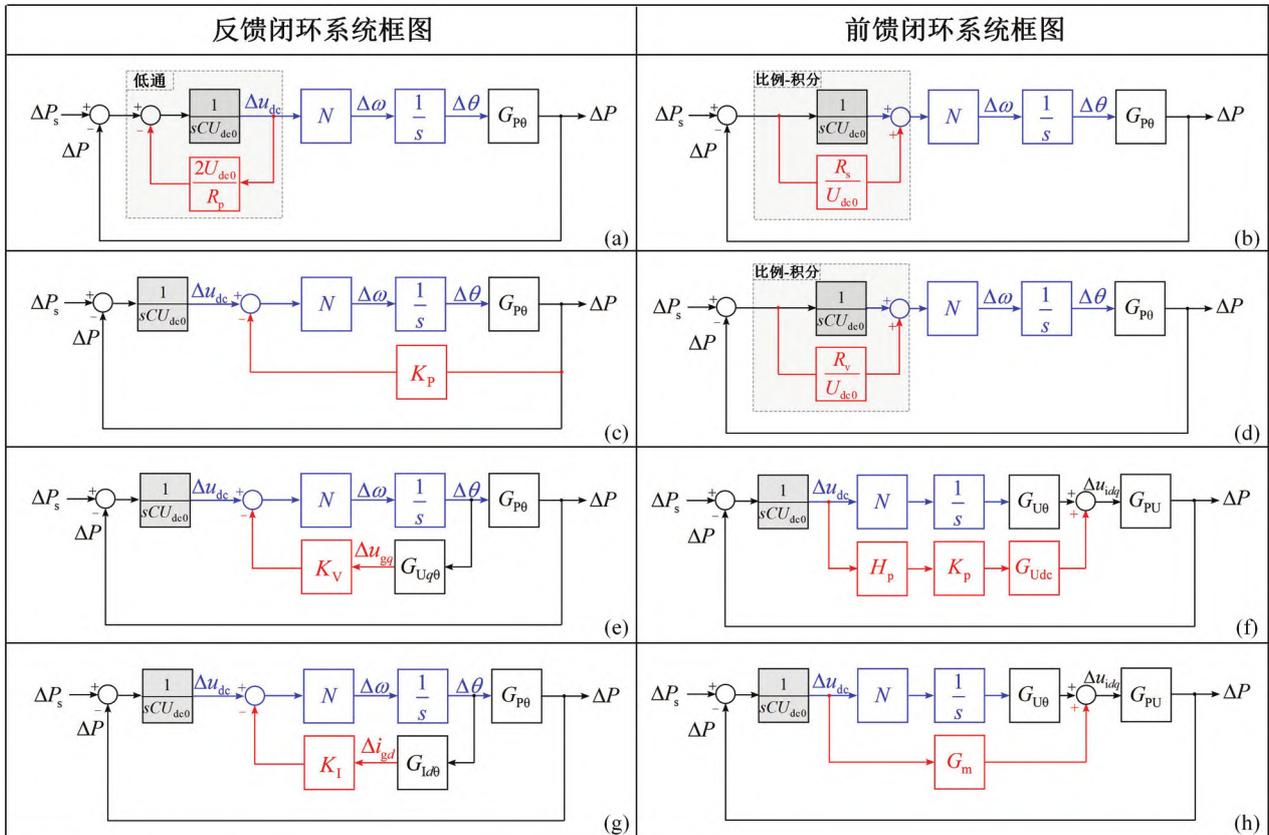


图6 反馈与前馈同步阻尼的匹配控制闭环系统框图

Fig.6 Block diagram of matching control closed-loop system with feedback and feedforward synchronous damping

式中: u_c 表示直流电容电压。在系统稳态即直流电容电压稳定时, 对上式进行小信号线性化, 可得有功功率差 $\Delta P_s - \Delta P$ 到电容电压 Δu_c 的传递函数为:

$$\frac{\Delta u_c}{\Delta P_s - \Delta P} = \frac{1}{CU_{dc0}s} \quad (18)$$

上式结果与式(3)一致相同, 表明电容电压动态在小信号分析时不受串联电阻影响, 但此时匹配控制采样的直流侧电压 u_{dc} 为直流电容 C 与串联电阻 R_s 上的电压之和, 即:

$$\Delta u_{dc} = \Delta u_c + R_s C \frac{d\Delta u_c}{dt} \quad (19)$$

联立式(18)和式(19)可解得:

$$\frac{\Delta u_{dc}(s)}{\Delta P_s(s) - \Delta P(s)} = \frac{1}{CU_{dc0}s} + \frac{R_s}{U_{dc0}} \quad (20)$$

此时系统的闭环框图将如图 6(b)所示。

横向对比图 6(a)与图 6(b)可以发现, 串联直流电阻将导致在原有的代表惯性的纯积分环节基础上再附加一个比例环节, 即变成比例-积分环节(PI 环节)。此时系统增加的不再是如图 6(a)中所示的反馈控制环节, 而是前馈控制环节, 同时其带来的阻尼效果也可以看做是前馈同步阻尼效果。当代表转子惯性的纯积分环节变为比例-积分环节时, 其所提供的相位也将由恒 -90° 变为从 -90° 到 0° 的过渡变化, 此时系统截止频率处的相位裕度也将同理得到明显改善。无阻尼情况下与附加直流串联电阻后的匹配控制波形对比也如图 7 中所示, 此时后者将能保证系统发生稳定的衰减过渡即保证小信号稳定, 得益于前馈阻尼环节带来的同步阻尼作用与系统相位裕度改善。

3.1.3 电网强度影响对比分析

上述两种典型的前馈与反馈阻尼的区别, 即是代表着相位同步控制中关于对有功功率究竟是比例-积分环节控制^[33]还是低通滤波环节控制^[22], 而两者其实也都可以共同归属到基于有功功率的同步控制之中。针对电网强度变化时对匹配控制系统带来的稳定性影响, 可以分为弱电网和强电网两种情况来讨论。当变换器与外部电网连接的线路阻抗增加, 即电网强度减小时, 可以验证的是无论是前馈还是反馈阻尼形式的匹配控制, 在合适的参数选取下系统均能保证弱网条件下稳定运行, 同时这也是最开始匹配控制在国内被研究提出的重要原因之一^[25]。匹配控制作为构网型控制技术中的一种, 其本质是基于有功功率的同步控制, 依靠自身有功潮流流动

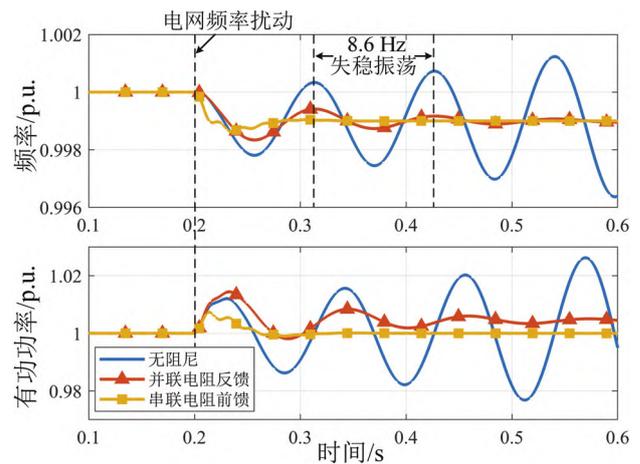


图 7 无阻尼、并联电阻反馈和串联电阻前馈的匹配控制小扰动波形对比

Fig.7 Small disturbance waveform comparison among undamped, parallel resistance feedback and series resistance feedforward matching control

实现并网同步, 而非如跟网型控制中的电压锁相环一般需要依靠较强的外部电网, 因此匹配控制系统的弱网稳定运行能力也是不难理解的。

与上述弱网运行相反的则是强网问题, 跟网型变换器的弱网不稳定与构网型变换器的强网不稳定是已被提出和发现的偶性问题之一^[11]。关于构网型变换器强网不稳定的直观解释在于当两个具有不同频率动态的交流电压源距离太近时(类比线路阻抗为 0 时两个不同频率电压源相接的极端情况), 系统本身天然就容易不稳定。强网不稳定问题的根源在于同步环、电压环和线路阻抗三者之间的耦合交互, 而这对于所有基于匹配控制的并网变换器系统而言也是一样的, 匹配控制下变换器的电压源属性并没有发生变化, 因此当电网强度增加时, 无论是何种阻尼作用, 相比于弱网运行, 系统都更容易发生强网不稳定问题。此时针对前馈阻尼形式的匹配控制系统, 可以适当减小前馈阻尼大小(等价于减小比例系数)以减小同步环控制带宽或增大电压环带宽的方式来缓解强网不稳定问题, 而针对反馈阻尼形式同样也是类似的。

3.1.4 前馈/反馈同步机理对比

上述 3.1.1 节和 3.1.2 节分析阐述了两种不同形式的同步阻尼作用, 即前者是在惯性积分环节处引入反馈环节, 整体可等价于低通滤波环节(LPF); 而后者则是引入前馈环节, 整体可等价于比例-积分环节(PI)。低通滤波环节所代表的是经典的同步发电

机同步控制(或者虚拟同步机控制和加入低通滤波器的有功-频率下垂控制),它的作用效果可以看做是牺牲对功率的快速控制换来了对频率的平稳控制,此时系统的等效惯性明显较大;而比例-积分环节则是直接将功率与频率直通,代表着的是优先满足功率的快速控制而牺牲了对频率的平稳控制,此时系统的等效惯性将明显减小。这两种控制架构所代表的是对频率构建的不同态度,即前者倾向于构建稳定且不易波动的交流频率,而后者则倾向于快速控制频率达到稳态以优先尽快实现有功平衡,此时其输出频率更多的是体现出一种随外界频率变化而迅速变化的跟随特性,而非前者的主动构建特性^[33]。上述差异特点也在图7所示的对比波形中有所体现,对比两种阻尼同步控制方式,当外部电网频率发生改变时,前馈阻尼的PI环节能比反馈阻尼的LPF环节实现更快速且波动更小的有功功率控制和频率响应,而其代价则是系统本身惯性较小,且难以为其它设备提供额外的惯性支撑,适用于系统本身惯性已经足够大或者对惯性大小没有太高要求但又追求控制速度的应用场景。

基于上述频率特性差异的理解,可以对构网型控制以及与其对偶的跟网型控制的运行特性能力进行进一步的深入辨析和区别探讨。从当前交流电力系统中往往最关心的电压幅值和相位频率两个维度出发,与同步发电机类似,构网型控制及设备被一致认为是同时具有电压构建和频率构建两种能力的,这也是构网型控制装备可以作为主力支撑电源且被广泛研究的重要原因之一。然而当仅改变其同步控制方法,例如上述将低通滤波环节更改为比例-积分环节时,由本节前述分析可知其频率构建能力将随之变为频率跟随能力^[33]。这种新型的同步控制方式可看做是解耦了传统构网型设备(以虚拟同步机控制为例)中通常被紧密绑定的电压构建能力和频率构建能力,是对传统构网型控制能力局限和基本特性的一种延伸扩展,即只实现电压构建而不实现频率构建^[33]。与此同时针对传统的跟网型控制(可以等效对偶认为是具备了电压跟随能力^[11]和频率跟随能力),已有相关文献研究提出了通过附加的惯量模拟控制环节^[47],可以使跟网型设备实现一定程度的频率惯性支撑响应(频率构建能力),但其仍然保留了电流环控制(电压跟随能力)。因此基于上述讨论分析,最终可以总结出如图8所示的交流电力系统并网设备的四象限能力特性图。传统的构网/

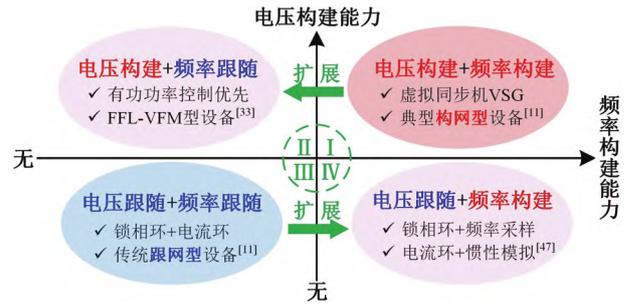


图8 交流电力系统并网设备的四象限能力特性图

Fig.8 Four-quadrant capability characteristic diagram of AC power system grid-connected equipment

跟网型设备,要么同时具有电压构建和频率构建能力,要么同时失去(即等价具有电压跟随和频率跟随能力),然而其实通过上述控制方法的拓展延伸,可以分别解耦并赋予并网设备不同的特性能力,最终使其可以在电压构建/频率构建的四象限范围内任意运行。

3.2 网侧控制同步阻尼

根据3.1节中的讨论分析可知,通过直流附加电阻为无阻尼匹配控制提供同步阻尼的方式可以分为反馈阻尼与前馈阻尼两类。而从相位裕度的角度分析出发,这两种阻尼作用均能改善原有积分环节所提供的恒 -90° 相位特性,从而提升系统小信号稳定性。在大多数现有研究之中,通常会在网侧变换器匹配控制的基础之上增加其它的同步控制支路,从而实现对应类似的同步阻尼作用效果。因此下面将按照反馈阻尼与前馈阻尼的分类方式,对现有网侧匹配控制中,各种附加同步控制支路的同步阻尼作用及其同步机理进行归纳总结。

3.2.1 反馈同步阻尼

在匹配控制中增添额外的同步控制支路,可实现类似于附加并联直流电阻的反馈阻尼效果。目前现有研究中已提出的控制方法主要有附加有功功率反馈控制^[44]和电压反馈控制^[43],其具体控制框图分别如图5(c)和(e)中所示。

在图5(c)的功率反馈控制架构中,其中 P 为变换器网侧瞬时输出有功功率,经反馈功率常数 K_P 后,与直流电压 u_{dc} 共同作为相位同步控制的输入量。当引入并联的功率控制支路时,变换器输出频率 $\Delta\omega$ 的表达式应由式(4)改写为:

$$\Delta\omega = N(\Delta u_{dc} - K_P \Delta P) \quad (21)$$

式中: K_P 表示功率反馈系数大小,此时系统的闭环框图如图6(c)所示。从图中可以看到该反馈阻尼是

施加在从频率到相位的积分环节之上的, 同理此时系统的相位特性和小信号稳定性也会得到明显改善。通过框图等效变换, 上述反馈阻尼也可以等价变换到施加在代表转子惯性的 $1/(sCU_{dc})$ 环节之上, 但值得注意的是此时的反馈系数不再是固定常数, 而是包含了功角动态的反馈传递函数。

对于图 5(e)中附加的电压反馈同步控制支路, 与图 5(c)中的功率反馈控制类似, u_{gq} 为变换器网侧输出电压的 q 轴采样值, 经电压反馈系数 K_V 后, 与直流电压 u_{dc} 共同作为相位同步控制的输入量。此时变换器的输出频率表达式 $\Delta\omega$ 也将由式(4)进一步改写为:

$$\Delta\omega = N(\Delta u_{dc} + K_V \Delta u_{gq}) \quad (22)$$

式中: K_V 表示电压反馈系数大小, 考虑变换器与无穷电网之间的同步动态, 变换器采样得到的 q 轴电压 u_{gq} 表达式为:

$$u_{gq} = -u_{gD} \sin \theta + u_{gQ} \cos \theta \quad (23)$$

式中: u_{gD} 和 u_{gQ} 表示网侧电压幅值大小, 即电网电压的幅值大小, 忽略其扰动对上式进行小信号线性化后可得:

$$G_{U_{gq}} = -\frac{\Delta u_{gq}}{\Delta \theta} = U_{gD0} \cos \theta_0 + U_{gQ0} \sin \theta_0 \quad (24)$$

最终系统的闭环框图如图 6(e)中所示, 其反馈同步阻尼也是施加在从频率到相位的积分环节之上的, 同理也可以进一步等效变换为施加在代表转子惯性的 $1/(sCU_{dc})$ 处的反馈阻尼, 此时的反馈阻尼则是包含了从相角到电压动态的传递函数, 系统相位裕度的改善也是可以预见的。

上述两种控制方式的反馈阻尼均能起到提升系统相位裕度的效果, 无阻尼匹配控制、附加功率反馈阻尼和附加电压反馈阻尼 3 种情况下的开环传递函数波特图以及截止频率附近的局部放大图如图 9(a)中所示。从图中可以看出 3 种情况下系统的截止频率大小前后变化不大, 但系统的相位特性却发生了明显的改善, 无阻尼匹配控制系统处于不稳定或者临界不稳定附近, 两种反馈阻尼控制方法均能保证系统在截止频率处的相位裕度为正。如图 9(c)所示为上述有阻尼控制情况下的小扰动波形对比验证, 当网侧无穷网在 3 s 时发生频率跌落扰动, 两种反馈阻尼控制均能保证系统稳定过渡。同时上述无阻尼匹配控制与两种反馈阻尼控制的稳定性指标定量比较如表 1 中总结所示。从中可以看出当施加有一定的反馈阻尼之后, 系统的关键闭环极点(距离

虚轴最近的极点)将会左移并使得其实部小于 0, 并且相位裕度也将由负变正, 系统小信号稳定性进而也将得到提升。同时值得注意的是, 上述结果仅能说明施加反馈阻尼之后可以提升无阻尼匹配控制系统的稳定性, 但依据相位裕度大小或极点移动距离对各种阻尼方法进行横向比较却不一定足够公平公正, 因此上述结果仅能作为稳定性提升依据, 而不能作为评价阻尼方法之间优劣程度的对比指标。

除了上述两种阻尼控制方式之外, 根据对偶控制架构以及归纳总结后可以推测, 除了可以引入交流功率和交流电压作为同步控制支路外, 还可以使用交流电流进行反馈阻尼控制, 其阻尼效果也应该是相似的。因此本文通过归纳整理后所提出的电流反馈阻尼的控制方式如图 5(g)所示, 其中 i_{gd} 为变换器输出电流的 d 轴采样值, K_I 为电流反馈系数。此时变换器的输出频率扰动信号 $\Delta\omega$ 将变为:

$$\Delta\omega = N(\Delta u_{dc} - K_I \Delta i_{gd}) \quad (25)$$

同理考虑同步动态, 采样得到的 d 轴电流 i_{gd} 稳态表达式为:

$$i_{gd} = i_{gD} \cos \theta + i_{gQ} \sin \theta \quad (26)$$

进行小信号线性化后可得:

$$\Delta i_{gd} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{gD} \\ \Delta i_{gQ} \end{bmatrix} + (-i_{gD0} \sin \theta_0 + i_{gQ0} \cos \theta_0) \Delta \theta \quad (27)$$

联立式(6)和式(9)可解得相角扰动信号 $\Delta\theta$ 到线路电感电流扰动信号 Δi_{gDQ} 的传递函数为:

$$\frac{\Delta i_{gDQ}}{\Delta \theta} = \begin{bmatrix} sL_g + R_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & sL_g + R_g \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -U_{id0} \sin \theta_0 - U_{iq0} \cos \theta_0 \\ U_{id0} \cos \theta_0 - U_{iq0} \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

因此可以得到从 $\Delta\theta$ 到 Δi_{gd} 的传递函数为:

$$G_{Id\theta} = \frac{\Delta i_{gd}}{\Delta \theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix}^T \frac{\Delta i_{gDQ}}{\Delta \theta} + (-i_{gD0} \sin \theta_0 + i_{gQ0} \cos \theta_0) \quad (29)$$

表 1 反馈阻尼控制的稳定性指标量化对比

Table 1 Quantitative comparison of stability indexes of feedback damping control

控制方式	关键极点	相位裕度/(°)
无阻尼控制	0.32±j8.60	-4.02
功率反馈控制	-5.00±j7.57	54.57
电压反馈控制	-0.91±j8.82	11.50
电流反馈控制	-2.83±j8.58	33.80

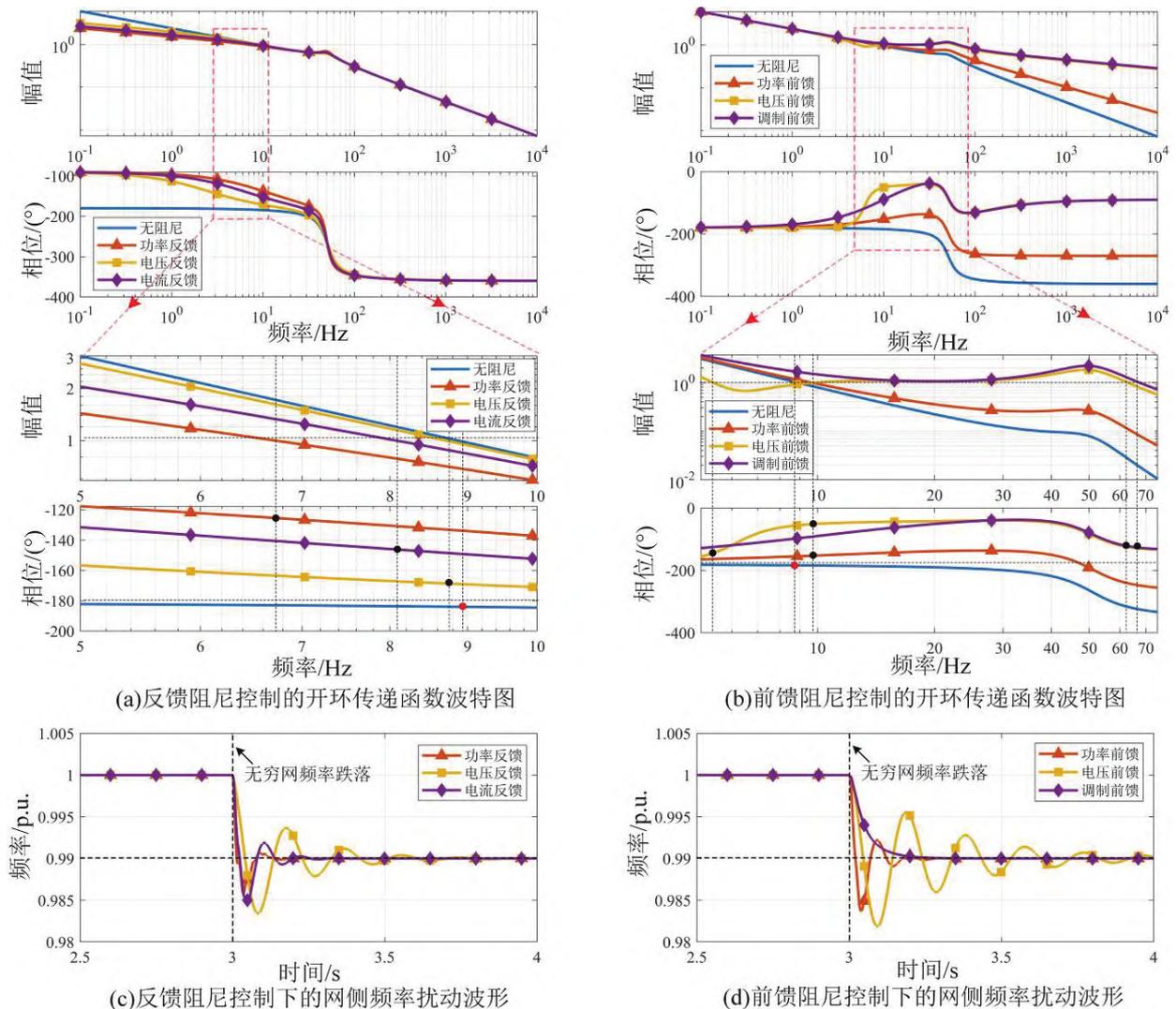


图9 反馈与前馈同步阻尼控制的相位裕度分析及网侧频率扰动波形对比

Fig.9 Phase margin analysis of feedback and feedforward synchronous damping control and waveform comparison of grid frequency disturbance

最终引入电流反馈阻尼控制的闭环系统框图如图6(g)所示,与前面的功率反馈和电压反馈控制类似,加入电流反馈控制也会在功率同步环中引入反馈阻尼环节,从而改善系统相位特性和提高系统小信号稳定性。其开环传递函数波特图与小扰动波形对比验证结果也如图9(a)和图9(c)中所示,稳定性量化指标也如表1中所示,同理也都再一次验证了反馈同步阻尼的稳定效果。此外值得注意的是,反馈型阻尼作为附加的同步控制支路,与直流电压 u_{dc} 共同决定了变换器输出频率大小,稳态时若其输出值不为0会影响直流电压 u_{dc} 的静态工作点,进而略微改变稳态时直流电压 u_{dc} 与交流频率 ω 的匹配特性。此时可通过调节 u_{dc}^* 或者 ω^* 以抵消或者消除反馈型阻尼所造成的稳态偏差影响。

3.2.2 前馈同步阻尼

除上述3种反馈同步阻尼之外,类似于3.1.2节中串联直流电阻的阻尼效果,目前也存在有施加前馈阻尼效果的附加网侧同步控制方式,具体包括有功功率前馈控制^[33]、直流电压前馈控制^[25,31]以及电压调制前馈控制^[31-32],其控制框图分别如图5(d)、(f)和(h)所示。

当采用如图5(d)所示的功率前馈控制时,其中 P_s 表示机侧输入瞬时有功功率, P 表示经过直流电容 C 之后输入到变换器的有功功率(即 P_s 和 P 分别表示直流电容两侧的有功功率), R_v 表示比例控制系数。在静态工作点附近,变换器输出频率 ω 的小信号表达式为:

$$\Delta\omega = N\Delta u_{dc} + \frac{NR_v}{U_{dc0}}(\Delta P_s - \Delta P) \quad (30)$$

其闭环系统框图为图 6(d), 从与图 6(b)的框图对比中可以发现功率前馈控制等价于在直流电容处串联了一个虚拟电阻, 代表的是典型的前馈同步阻尼。类比 3.1.2 节中对实际串联直流电阻的分析可知功率前馈控制的阻尼作用效果与相位特性的改善, 以及所带来的小信号同步稳定性提升。

图 5(f)所示的直流电压前馈控制是最早被提出应用的一种阻尼控制方式, 其具体是指将直流电压 u_{dc} 经过一阶高通滤波器 H_p 和比例环节 K_p 后, 引入到交流输出电压 u_{idq}^* 的幅值控制之中, 其在国内又被称作“网侧致稳控制器”^[31]。此时在 dq 同步坐标系中的变换器电压输出幅值 u_{idq} 将由无扰动变为:

$$\Delta u_{id} = K_p \frac{T_p s}{T_p s + 1} \Delta u_{dc} \quad (31)$$

式中: K_p 表示前馈系数大小; T_p 为高通滤波时间常数, 令 $H_p(s)$ 表示高通滤波传递函数 $T_p s / (T_p s + 1)$, q 轴电压幅值将保持为 0 不变。因此式(6)将改写为:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{id} \\ \Delta u_{iq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{id0} \sin \theta_0 - U_{iq0} \cos \theta_0 \\ U_{id0} \cos \theta_0 - U_{iq0} \sin \theta_0 \end{bmatrix} \Delta \theta + \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} \Delta u_{id} \quad (32)$$

此时闭环系统框图将如图 6(f)所示, 其中 $G_{U_{dc}} = [\cos \theta_0 \ \sin \theta_0]^T$ 。从闭环框图中可以明显看出, 此时的前馈控制环节也由固定常数变为了高通滤波环节, 并且此前馈控制是施加在从频率到相位的积分环节之上的, 同理可以推测系统的相位特性改善和同步稳定性提升。

图 5(h)所示为电压调制前馈控制框图, 其中 G_{DEL} 表示控制器时延可约等于 1, 与上述所有的控制方式不同, 此控制没有附加同步控制支路而是改变相关调制策略, 即控制器在生成正弦调制波时不选择除以实时采样的直流电压 u_{dc} (可消除直流电压波动对变换器输出电压幅值的影响)而是除以直流电压的预设平均值常数 \bar{u}_{dc}^* , 因此此时变换器的输出电压幅值将同时受到直流侧电压 u_{dc} 波动和调制波幅值 u_{idq} 控制的影响。在 DQ 旋转坐标系下变换器输出电压幅值 u_{iDQ} 将由式(5)改写为:

$$\begin{bmatrix} u_{iD} \\ u_{iQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{id} \frac{u_{dc}}{\bar{U}_{dc}} \\ u_{iq} \frac{u_{dc}}{\bar{U}_{dc}} \end{bmatrix} \quad (33)$$

式中: \bar{U}_{dc} 表示调制时除以的预设常数, 对上式进

行小信号线性化后可得:

$$\Delta u_{iDQ} = G_{U_{dc}} \frac{U_{dc0}}{\bar{U}_{dc}} \Delta \theta + G_m \Delta u_{dc} \quad (34)$$

其中

$$G_m = \begin{bmatrix} \frac{U_{id0}}{\bar{U}_{dc}} \cos \theta_0 + \frac{U_{iq0}}{\bar{U}_{dc}} \sin \theta_0 \\ -\frac{U_{id0}}{\bar{U}_{dc}} \cos \theta_0 - \frac{U_{iq0}}{\bar{U}_{dc}} \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

简单起见令 $U_{dc0} = \bar{U}_{dc}$, 此时闭环系统框图将如图 6(h)中所示, 调制时选择除以常数而非实时直流电压将会引入从直流电压扰动到输出电压幅值扰动的前馈控制环节, 并且此时的前馈系数为常数, 同理也可预测其同步阻尼作用以及对系统稳定性的提升效果。

上述 3 种前馈同步阻尼控制的开环传递函数波特图如图 9(b)所示。从中可以看出 3 种前馈控制均能改善系统的相位特性, 保证系统截止频率处的相位裕度为正。图 9(d)为 3 种前馈阻尼控制下匹配控制在网侧频率跌落扰动时的波形对比图, 3 种前馈控制均能保证系统小信号稳定, 满足前述理论分析。无阻尼匹配控制与上述 3 种前馈阻尼控制的稳定性指标量化比较如表 2 中总结所示, 同样也能直接看出前馈阻尼控制为无阻尼匹配控制系统所带来的稳定性提升效果。本文中所提到的基于反馈与前馈同步阻尼的匹配控制文献归纳总结如表 3 中所示。

表 2 前馈阻尼控制的稳定性指标量化对比

Table 2 Quantitative comparison of stability indexes of feedforward damping control

控制方式	关键极点	相位裕度(°)
无阻尼控制	0.32±j8.60	-4.02
功率前馈控制	-2.30±j8.72	26.71
直流电压前馈	-0.51±j5.04	35.70
调制前馈控制	-4.06±j5.18	52.46

表 3 基于反馈与前馈同步阻尼的匹配控制部分文献梳理

Table 3 Part of literature review of matching control based on feedback and feedforward synchronous damping

分类	控制方式	特点	文献
反馈阻尼	附加并联电阻	等效模拟开关器件损耗	[24,35]
	功率反馈控制	阻尼低频同步振荡	[44]
	电压反馈控制	阻尼低频同步振荡	[43]
	电流反馈控制	归纳对比后提出	本文提出
前馈阻尼	附加串联电阻	归纳对比后提出	本文提出
	功率前馈控制	虚拟直流串联电阻	[33]
	直流电压前馈	类比增加电气阻尼	[25,31]
	调制前馈控制	调制选择	[31-32]

匹配控制作为直流电压同步控制中一种较为特殊的控制方式^[29],其核心在于仅仅通过对直流电压进行最简单的比例控制后即可得到输出频率,其直观的物理意义也在于对同步机转子惯性的直接模拟匹配。目前研究中也存在其它利用直流电压动态进行同步控制的控制方法,例如将匹配控制中的比例环节 N 变为 $(s+K_T)/(sK_I+K_D)$ 形式的传递函数环节^[37]。通过合理设计控制器参数后,上述控制方式也能在系统截止频率处提供大于零的正相位,从而改善系统的相位特性和保证系统小信号稳定。但值得注意的是,此时变换器的同步机制不再是对同步机转子惯性的匹配模拟,因此从严格意义上来说其无法归类到匹配控制或者惯性同步控制之中,而是其它的基于直流电压动态的同步控制方法(因此其同时也被叫做虚拟同步控制)。

3.3 机侧控制同步稳定性提升

上述 3.1 节和 3.2 节都是在将机侧系统等效为恒功率输出的前提下进行的,这是由于当机侧变换器不对直流电压波动进行控制或响应时(此时直流母线电压完全由网侧变换器控制),网侧扰动基本不会对机侧状态和功率输出产生影响,因此可等效为恒功率输出。而如图 10(a)中示意图所示,当把机侧变换器及其对直流母线电压的控制响应考虑在内时,此时整体系统规模不再是之前的单机并无穷网而是包含了机侧变换器、直流母线线路阻抗和网侧变换器等在内的两机甚至多机系统。此时机侧输出的有功功率对于网侧变换器而言不再是恒值,而是包含了机侧控制动态特性在内的,此时整体系统的阻尼作用其实是同时由机侧控制系统和网侧控制系统共同提供的。因此不同的机侧控制方法将会为整体系统带来不同的稳定性影响,甚至可以实现对网侧无阻尼匹配控制的稳定支撑作用。

为进一步验证机侧控制的引入(非恒功率输出)对系统同步稳定性的提升效果以及对后级网侧无阻尼匹配控制的稳定支撑作用,图 10(b)给出了当网侧变换器保持使用无阻尼匹配控制时,简单起见以与无穷网相连的机侧变换器为例(此时直流母线两端均存在等效的直流电容,并且两者之间存在着较小的线路阻抗),机侧变换器从使用无阻尼匹配控制到使用有阻尼匹配控制前后的对比波形。如图 10(b)中所示,在 1 s 时网侧无穷网频率跌落,此时机侧与网侧变换器均采用无阻尼匹配控制,则网侧变换器输出频率会明显进行发散振荡;而 1.6 s 时在机侧

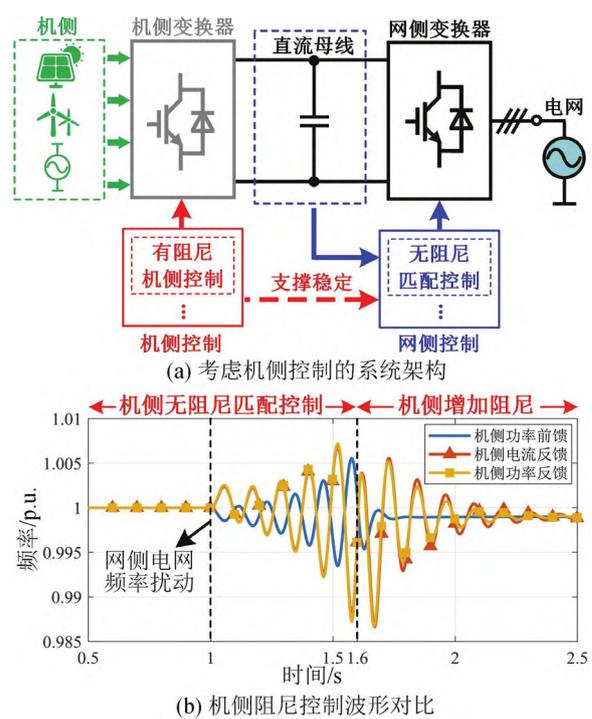


图 10 机侧控制系统提升整体系统同步稳定性

Fig.10 Machine side control system improves the overall system synchronization stability

控制中加入阻尼控制支路,此时系统又能重新恢复稳定。上述对比差异验证说明了机侧变换器控制可以实现对整体系统稳定性的提升,以及对网侧无阻尼匹配控制的稳定支撑作用。

4 匹配控制典型应用案例分析

匹配控制作为近几年才提出的构网型控制技术,目前研究中对其系统应用的价值认知和特性认知其实还有所欠缺。匹配控制能广泛适用于绝大多数直流侧为非理想直流电压源的实际场景,具有不可忽视的发展潜力和应用前景。因此本章将针对不同典型场景下的匹配控制系统进行案例分析,以重点揭示和提高其应用价值认知与能力特性认知。

4.1 构网型光伏发电机组

在传统两级式光伏发电并网系统中,机侧 DC-DC 变换器常采用最大功率点跟踪控制算法以追求光伏阵列的最大对外出力,此时其直流母线电压的稳定一般需要依靠外施直流储能装置或由网侧变换器采用跟网型控制架构承担。而将匹配控制应用于光伏发电系统的网侧变换器之中,既可以在保证直流母线电压稳定的前提下舍去直流储能装置以节省成本,同时又能保证网侧变换器处于构网运行

模式之中, 是一种潜在可行的光伏构网控制方案^[33]。

如图 11(a)所示为基于匹配控制的两级式光伏发电并网系统架构, 其中机侧 DC-DC 控制采用最大功率点跟踪控制算法, 网侧并网变换器采用图 5(d)所示的功率前馈阻尼下的匹配控制。为了验证匹配控制在光伏发电并网系统之中的可行性, 本文也进行了相应的实验测试, 实验架构与图 10(a)中保持一致, 其中光伏发电机组产生的恒功率输出由 Chroma 公司生产的 62020H-150S 型程控直流电源等效替代, 并网变换器机组采用的是 Myway 公司生产的 MWINV-9R144 型变换器, 电网模拟器采用的是 Chroma 公司生产的 61845 型回收式电网模拟电源。与此同时为了验证对比 3.1.4 节中所提到的基于前馈 PI 与反馈 LPF 的同步机理差异, 本文也在相同实验条件下进行了典型的跟网型控制与虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制(等价于加入低通滤波器的有功-频率下垂控制)的并网实验对比, 在这两种情况下直流模拟电源则被设定为理想恒压模式。当网侧无穷网频率改变时, 3 种控制方式下网侧变换器输出频率及功率的实验对比波形如图 10(b)中所示。当外界无穷网频率改变时, 相比于 VSG 构网型控制, 使用前馈同步阻尼的匹配控制可以更迅速地使变换器工作频率和输出功率达到稳态值, 并且频率波动与功率波动也小于 VSG 控制。这样的实验波形差异除了相关控制参数大小之外, 还是由于不同的同步机理所导致的, 正如 3.1.4 节中的对比总结, 功率前馈阻尼形式的匹配控制等价于在有功功率同步控制中引入了一个比例-积分 PI 环节, 相比与 VSG 控制中的低通滤波 LPF 环节, 比例-积分 PI 形式下的控制架构响应速度天然更快, 能带来更迅速的功率控制以及频率跟随响应。同时功率前馈型匹配控制的实验波形也更加类似于跟网型控制, 这也得益于两者相同的比例-积分 PI 形式的同步机制, 只是其中前者输入为有功功率, 后者锁相环输入为交流电压。

4.2 构网型风力发电机组

匹配控制在国内最早的应用领域之一就是风力发电领域, 无论是双馈风力电机^[25]还是全功率变换风机^[31,38], 采用匹配控制均能摒弃跟网型控制中的电压-锁相环实现自同步并网和弱网条件下的并网稳定运行, 且控制架构简单易行, 尤其适用于直流母线中往往不含储能装置的风电场站。而在此基础之上为了增强网侧变换器的惯性响应能力, 上海

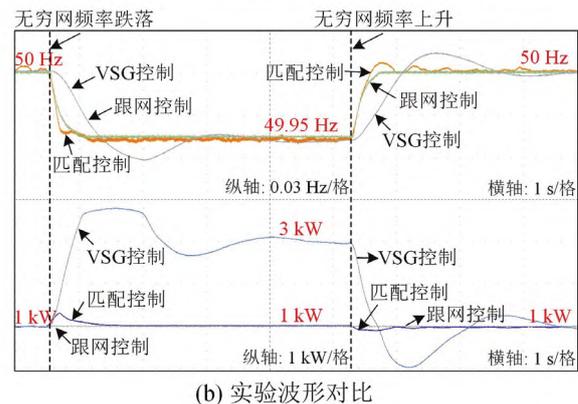
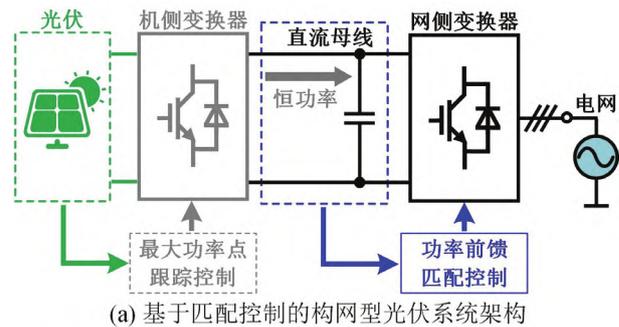


图 11 基于匹配控制的光伏发电系统架构及实验波形对比
Fig.11 Photovoltaic power generation system architecture and experimental waveform comparison based on matching control

交通大学研究团队还提出在风电机组的机侧控制中引入惯性传递控制, 即引入直流电压 u_{dc} 经过微分环节后(或再级联低通滤波器以消除高频噪声)的机侧功率控制支路^[31]。其效果是当网侧电网负荷增加导致网侧频率降低时, 直流电压也会随之下降, 此时机侧的风电机组将会出力更多有功, 利用风机风轮内部储能实现对外界惯性支撑响应能力的进一步提升。

如图 12(a)中所示为典型的基于带阻尼匹配控制的全功率风力发电系统架构, 此时风电机组采用永磁同步电机, 风力保持为恒功率输入, 机侧变换器采用矢量电流控制(或可再施加最大功率点跟踪控制外环以调节风机转速和追求最大出力)和惯性传递控制, 网侧变换器采用调制前馈形式的匹配控制。图 12(b)所示为在没有惯性传递控制下, 网侧变换器从无阻尼到分别带调制前馈阻尼和功率反馈阻尼的扰动对比波形, 从中首先可以看出的是无阻尼时网侧系统将进行发散振荡, 而无论是施加前馈阻尼还是反馈阻尼系统都将实现稳定的衰减过渡和保证小信号稳定。此时整体风力发电系统的稳定机理和 3.2 节中的分析是类似的, 由于此时的风机和机侧变换器都没有对直流母线电压进行控制响应, 因

此对于网侧变换器而言，前级机侧输出可近似看做恒功率输出，此时系统的稳定情况将取决于是否拥有足够的前馈或反馈阻尼作用。进一步对比调制前馈阻尼控制与功率反馈阻尼控制的扰动波形，可以看出此时调制前馈阻尼的阻尼作用更强，网侧系统能更快恢复稳定。

图 12(c)是网侧电网频率跌落时，网侧变换器在有网侧惯性传递控制对比下的输出频率和输出有功功率波形图。从图中可以看到，在 0.5 s 网侧频率跌落时，没有惯性传递控制的风力发电系统基本无法对外提供额外的有功功率和惯性支撑响应；而施加有惯性传递控制的系统则能在较短时间尺度内，迅速抽取风机风轮储能以输出更多有功功率，增加网侧变换器对外等效惯性，并对外提供惯量支撑。同时值得思考的是，由于直流电容上的储存能量和等效惯性都远远小于同步发电机，因此通常仅凭网侧匹配控制系统，其能对外的等效惯性和惯量支撑响应十分有限，例如 4.1 节中无储能光伏系统的匹配控制架构，牺牲对外的惯性支撑能力以换取更为迅速的有功功率控制和频率跟随特性。与此同时作为对比，网侧匹配控制系统若想增加对外的惯性支撑能力和系统等效惯性，则需要如本节案例所示依靠机侧储能和附加控制环节（风机风轮储能与惯性传递控制）以实现对外交流系统的惯性支撑能力提升，但此时也需要注意储能/有功备用容量与惯性支撑能力的协调配合。

4.3 构网型静止无功发生器

静止无功发生器(static var generator, SVG)是一种动态无功补偿装置，相比于功能类似的同步调相机，其占地面积更小，控制方式更灵活，具备良好的动态响应特性，因此常用来做功率因素调节和无功电压支撑^[48]。目前大规模新能源集群场站中也常配置一定数量的静止无功补偿器以支撑并网点电压稳定和提升系统稳定性^[49]。同时静止无功发生器也是典型的非理想直流电压的工程场景，其直流侧电容作为无功功率源，而并没有如之前两个案例中直接的机侧有功功率输入，因此静止无功发生器在对外进行无功交换的同时需要依靠自身控制保证直流电容电压稳定。传统 SVG 控制通常采用跟网型控制架构，利用电压锁相环实现并网同步和电流环控制无功输出，难以满足宽频带的电压支撑需求^[50]。因此在构网型的静止无功发生器之中，匹配控制其实也具有一定的应用能力。

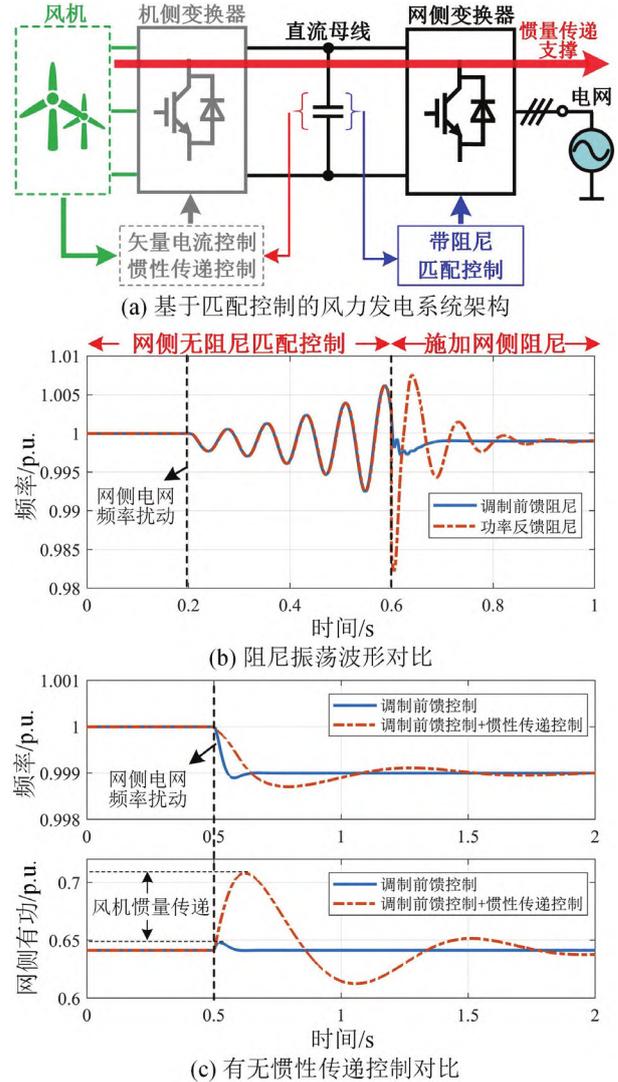


图 12 基于匹配控制的风力发电系统架构与响应波形对比
Fig.12 Wind power system architecture based on matching control and response waveform comparison

如图 13(a)所示为基于带阻尼匹配控制的静止无功发生器并风力发电系统的系统架构，图 13(b)所示为在上述系统之中，当网侧电网因故障导致电压跌落和故障清除电压恢复时，风电场公共并网点处电压幅值的变化情况。从图 13(b)中可以看出，当没有匹配控制型 SVG 时，公共点处的电压幅值将会显著跌落；而无论是施加带前馈阻尼还是反馈阻尼的匹配控制 SVG 之后，则都可以快速实现对公共点处的无功补偿和电压支撑。匹配控制 SVG 的直流侧可以看做是有功功率为 0 的恒功率输入，因此其同步稳定机理也是如之前所述取决于是否拥有足够前馈或反馈阻尼作用。对比图 13(b)中的前馈阻尼波形和反馈阻尼波形可以看出，此时功率前馈的匹配控制 SVG 能更快实现对并网点处的电压支撑

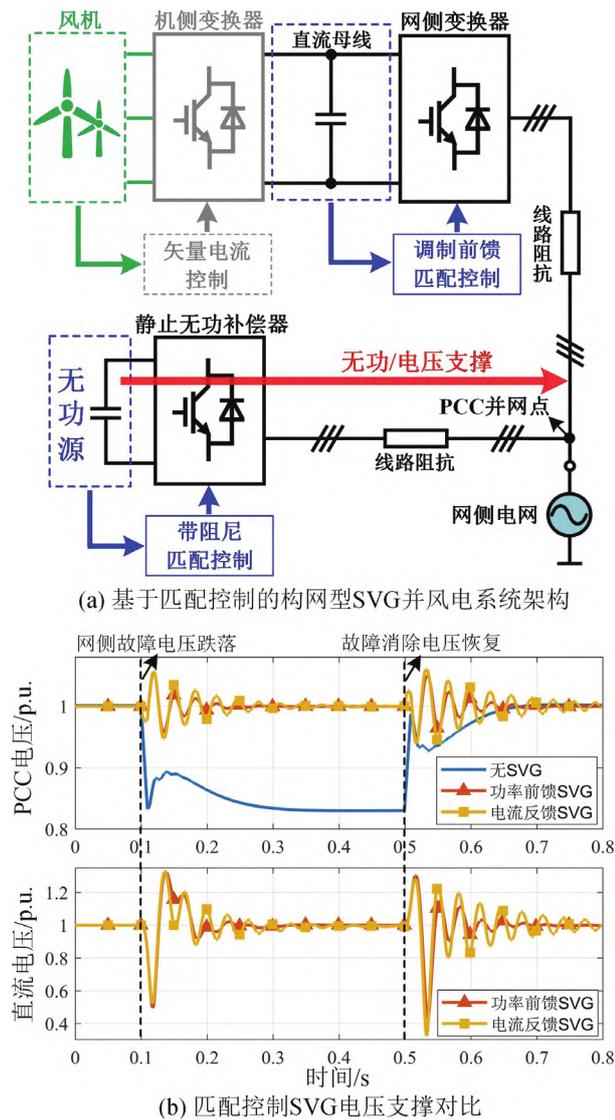


图 13 基于匹配控制的构网型 SVG 并风电系统架构及电压支撑对比验证

Fig.13 Architecture of grid-forming SVG based on matching control with the wind power system and the verification of voltage support

效果。与此同时结合 4.1 节中关于同步机理的对比分析, 上述无功-电压支撑的快速响应结果, 其实也大致从侧面反应了, 比例-积分形式的同步控制架构在牺牲频率惯性的同时, 可以控制频率更迅速的达到稳态值, 进而可帮助提高无功/电压控制的响应速度。

4.4 构网型柔性直流输电系统

柔性直流输电系统也是典型的非理想恒压直流母线的工程场景, 因此在这之中匹配控制也是可以适用的。在传统的柔直系统中, 为了控制直流母线电压稳定, 通常需要某一端换流站工作在跟网运

行模式之中, 而采用匹配控制的换流站则能同时实现交直流双端口的构网控制运行^[45-46], 即匹配控制既能控制交流侧电压幅值大小, 同时又能同时保证直流侧的电压稳定。而当柔直系统两端换流站都同时采用匹配控制时^[36], 某一侧交流系统负荷的增加(本地交流频率随之降低)会导致其临近直流侧电压的降低, 此时直流母线两端电压差增大, 因此另一侧换流站将会自动响应输出更多的有功, 即此时的柔直系统能自发进行惯性响应而无需额外的控制支路或通讯手段。

基于匹配控制的柔性直流系统的稳定机理如前 3.2 和 3.3 节中所述, 当两端换流站都为带阻尼的匹配控制时, 直流线路两端的电压动态会受到各自临近换流站的控制影响, 此时整体系统的阻尼作用同时由两端换流站共同提供从而能保证自身稳定。同时可以验证的是, 当仅有一端换流站采用带阻尼的匹配控制且阻尼作用足够时, 系统同样也能保持稳定。此时对于无阻尼一侧的换流站而言, 其直流侧特性并非恒功率源特性, 而是包含了另一侧换流站的控制动态响应在内的, 因此此时系统在整体阻尼作用足够时也可以保持稳定。

匹配控制将交流侧频率与直流侧电压直接进行匹配耦合, 其效果在于当交流侧频率能够保持稳定时, 直流侧电压也会因此而保证稳定, 反之亦然。基于上述匹配关系, 当柔直系统两端换流站均采用匹配控制同步时, 整个系统的支撑构建可以仅由单一构网型机组实现, 即实现文献[34]中所提出的构网支撑传递效果。构网支撑传递是指通过双端或多端换流站的匹配控制, 柔直系统中任意一处位置(任一换流站交流侧、任一换流站直流侧、任意直流母线线路中间)布置有构网型机组时(交流电网、同步发电机、构网型变器或直流电源等), 柔直系统所有的交流侧与直流侧电压均能同时实现稳定构建。

为便于理解, 图 14(a)给出了一种典型的构网支撑传递的系统案例, 图 14(b)给出了图 14(a)在故障前后所对应的两侧换流站运行波形。图 14(a)表示当交流电网 1 因故障脱网时, 故障点处换流站 1 的交流侧电压频率将会由另一侧的交流电网 2 进行传递支撑稳定。图 14(b)给出了上述故障发生前后两端换流站的工作波形, 从中可以看出无论是何种阻尼控制, 当交流电网 1 脱网后, 剩余系统都将保持稳定运行, 包括直流母线两端电压以及故障点处的交流电压和频率, 此时整体系统的支撑稳定由交流电网

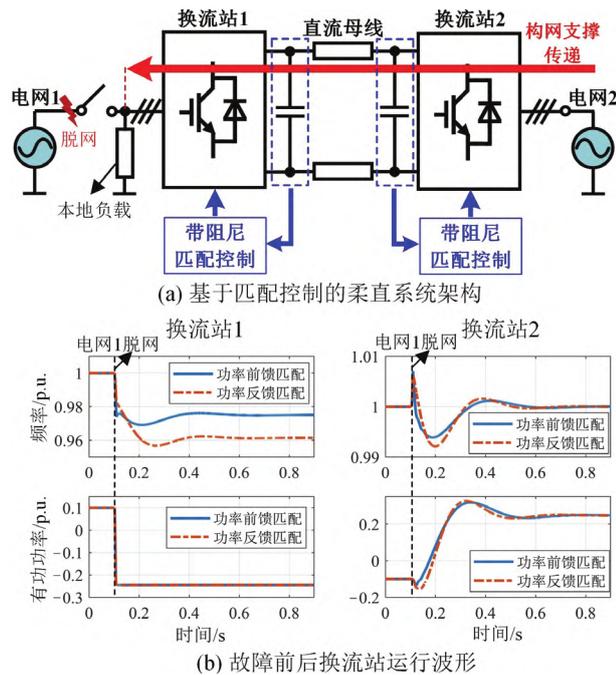


图 14 基于匹配控制的柔直系统架构及构网支撑传递验证
Fig.14 Control of HVDC system based on matching control and verification of grid-forming capability transfer

2 维持的,即实现构网支撑传递效果。与此同时从最终波形对比中可以看出,换流站 1 稳态时频率的不一致是由于功率反馈控制阻尼会略微改变直流电压与交流频率的匹配关系,此时可调节参考值进行修正。除此之外,在多端柔直系统中匹配控制也能同样适用,上述构网支撑传递也将由双端系统的一对一支撑变成多端系统的一对多支撑,同样能保证整体柔直系统在仅发生单点故障情况下的障后稳定运行,并提高柔直系统的故障暂态支撑能力。

5 总结展望

匹配控制(或被称为惯性同步控制、直流电压同步控制等)作为现有构网型控制中重点考虑了直流电压动态的控制方法,适用于光伏发电、风力发电、静止无功补偿和柔性直流输电等直流侧为非理想直流源的应用场景。匹配控制将直流电容的电压动态与同步发电机的转子惯性进行匹配模拟,从而实现类同步机的有功功率同步控制,但同时也会由于没有等效模拟出阻尼绕组作用而难以保证小信号同步稳定性。本文通过对比归纳,提出了反馈与前馈同步阻尼的分类方法,从直流侧附加电阻,网侧附加阻尼控制和机侧附加阻尼控制 3 个层面,总结归纳了匹配控制的同步阻尼方法并揭示其同步稳定机

理。同时本文也分别对基于构网型匹配控制的光伏发电并网系统、风力发电并网系统、静止无功补偿器和柔性直流输电系统 4 种典型应用场景进行了案例分析,有助于提高对匹配控制的实践应用认知和能力特性认知,并为后续研究提供一定的参考借鉴。

最后针对匹配控制技术进行未来展望,首先在小扰动分析方面,单机-无穷网情况下的小扰动稳定性分析已比较成熟,但针对大规模场站集群的多机系统级分析还有所欠缺,匹配控制与其它构网型和跟网型控制的交互机理和可能的振荡失稳问题还值得进一步研究确定。其次在大扰动分析方面,匹配控制相比于其它构网型控制,由于包含机侧系统在内的直流侧特性并非理想直流电压源,因此在考虑机侧限制的情况下,如何揭示匹配控制系统的暂态失稳机理并刻画其稳定域边界等还需加以研究。最后针对实际应用,目前国内针对基于匹配控制(惯性同步控制)的风力发电系统已开展了相关的示范工程验证,然而对于其它应用场景还比较欠缺。并且在面向不同工程应用场景时,如何选择最优阻尼控制方法、与其它类型装备的协调控制运行和故障保护穿越策略等现实问题也需要进一步深入研究。

参考文献 References

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,国家数据局.关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027 年)》的通知[EB/OL].(2024-07-25)[2024-08-06].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202408/t20240806_1392260.html. National Development and Reform Commission, National Energy Administration, National Bureau of Statistics of China. Notice on the issuance of the Action Plan for Accelerating the Construction of New Power System (2024—2027)[EB/OL].(2024-07-25)[2024-08-06].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202408/t20240806_1392260.html.
- [2] 国家能源局.截至 7 月底全国累计发电装机容量超 31 亿千瓦[EB/OL].(2024-08-30).https://www.nea.gov.cn/2024-08/30/c_1310-785411.htm. National Energy Administration, China's cumulative installed power generation capacity exceeded 3.1 Billion Kilowatts by the end of July [EB/OL].(2024-08-30).https://www.nea.gov.cn/2024-08/30/c_1310-785411.htm.
- [3] 刘永奇,陈龙翔,韩小琪.能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J].中国电机工程学报,2022,42(2):515-524. LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-524.
- [4] 蔡希鹏,黄伟煌,李桂源,等.大规模光伏集群经柔性直流构网送出的运行控制技术研究[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8734-8744. CAI Xipeng, HUANG Weihuang, LI Guiyuan, et al. Research on operation control strategy of large-scale photovoltaic cluster transmission via grid-forming VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8734-8744.
- [5] 刘芳,刘威,汪浩东,等.高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J].高电压技术,2022,48(1):95-113. LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation

- mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 95-113.
- [6] 袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(5): 1904-1916. YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1904-1916.
- [7] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 461-474. XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 461-474.
- [8] 王盼宝, 王 鹏, 李坤光, 等. 电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 3829-3837. WANG Panbao, WANG Peng, LI Shengguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 3829-3837.
- [9] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [10] 许靖涛, 刘 威, 刘 树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. *电网技术*, 2022, 46(9): 3586-3594. XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [11] LI Y T, GU Y J, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4541-4554.
- [12] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2020, 1: 115-134.
- [13] FANG J Y, LI X Q, LI H C, et al. Stability improvement for three-phase grid-connected converters through impedance reshaping in quadrature-axis[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(10): 8365-8375.
- [14] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a vsc-hvdc converter[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [15] 李雨果, 易 皓, 姜 鑫, 等. 极弱电网下新能源跟网逆变器低频振荡的机理探究与暂态无功过补偿稳定性提升策略[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 482-496. LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable-energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 482-496.
- [16] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Power-Synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 809-820.
- [17] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-Forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2021, 2: 93-109.
- [18] 黄 萌, 凌扬坚, 耿 华, 等. 功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J]. *高电压技术*, 2023, 49(11): 4571-4583. HUANG Meng, LING Yangjian, GENG Hua, et al. An overview on multi-vscs interaction analysis and stability controls of grid-forming converters with power synchronization control[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(11): 4571-4583.
- [19] LI Y T, GU Y J, ZHU Y, et al. Impedance circuit model of grid-forming inverter: visualizing control algorithms as circuit elements[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(3): 3377-3395.
- [20] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, 29(1): 136-143.
- [21] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(2): 613-625.
- [22] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(1): 394-395.
- [23] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 349-360. LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 349-360.
- [24] JOUIN T, ARGHIR C, DÖRFLER F. Grid-Friendly matching of synchronous machines by tapping into the DC storage[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(22): 192-197.
- [25] 张 琛, 蔡 旭, 李 征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 476-486. ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 476-486.
- [26] SEO G S, COLOMBINO M, SUBOTIC I, et al. Dispatchable virtual oscillator control for decentralized inverter-dominated power systems: analysis and experiments[C]/2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Anaheim, USA: IEEE, 2019: 561-566.
- [27] SINHA M, DÖRFLER F, JOHNSON B B, et al. Uncovering droop control laws embedded within the nonlinear dynamics of van der pol oscillators[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(2): 347-358.
- [28] 刘 辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-16[2024-12-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007.html>.
- [29] LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-16[2024-12-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007.html>.
- [29] 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 Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [30] ZHAO L, WANG X F, JIN Z M. Impedance-based dynamics analysis for DC-link voltage-synchronized voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(9): 10829-10844.
- [31] 桑 顺, 张 琛, 蔡 旭, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一): 控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5604-5615. SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control of wind turbines with full-scale converters (Part I): control architecture and stability analysis under weak grid conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5604-5615.
- [32] 高本锋, 邓鹏程, 孙大卫, 等. 基于匹配控制的构网型直驱风电场次同步振荡机理与特性研究[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(9): 2755-2770. GAO Benfeng, DENG Pengcheng, SUN Dawei, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation of grid-forming direct-drive wind farm based on matching control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(9): 2755-2770.
- [33] AI C, LI Y T, ZHAO Z W, et al. An extension of grid-forming: a frequency-following voltage-forming inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(10): 12118-12123.
- [34] AI C, LI Y T, LI C P, et al. Grid-Forming capability transfer and active power flow control in a VSC-HVDC system[C]/2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). Chengdu, China: IEEE, 2024: 591-596.

- [35] ARGHIR C, DÖRFLER F. The electronic realization of synchronous machines: model matching, angle tracking, and energy shaping techniques[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4398-4410.
- [36] 杨仁炳, 张琛, 蔡旭. 具有频率实时镜像和自主电网同步能力的风电-柔直系统控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 496-506.
YANG Renbin, ZHANG Chen, CAI Xu. Control of VSC-HVDC with real-time frequency mirroring and self-synchronizing capability for wind farm integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 496-506.
- [37] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [38] 秦垚, 王晗, 邓祯彦, 等. 自同步电压源永磁直驱风电机组的直流电压同步机制及其统一控制结构[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 31-41.
QIN Yao, WANG Han, DENG Zhenyan, et al. Synchronization mechanism and unified control structure for PMSG-based WTGs by using the DC-link voltage to realize self-synchronous voltage source control[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 31-41.
- [39] 高本锋, 董涵泉, 孙大卫, 等. 匹配控制构网型直驱风电场经LCC-HVDC送出系统的次同步振荡特性及机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(23): 9296-9309.
GAO Benfeng, DONG Hanxiao, SUN Dawei, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics and mechanism analysis of matching-control-based grid-forming direct drive wind farm transmitted through LCC-HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(23): 9296-9309.
- [40] 秦垚, 王晗, 杨志千, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(二): 电网故障穿越控制与保护[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 530-542.
QIN Yao, WANG Han, YANG Zhiqian, et al. Voltage source control of wind turbine generators with full-scale converters (part II): control and protection of grid fault ride-through[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 530-542.
- [41] ARGHIR C, JOUINI T, DÖRFLER F. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. *Automatica*, 2018, 95: 273-282.
- [42] STALLMANN F, MERTENS A. Sequence impedance modeling of the matching control and comparison with virtual synchronous generator[C]//2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2020: 421-428.
- [43] ZHAO L, JIN Z M, WANG X F. Small-signal synchronization stability of grid-forming converters with regulated DC-Link dynamics[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(12): 12399-12409.
- [44] ZHAO L, JIN Z M, WANG X F. Analysis and damping of low-frequency oscillation for DC-Link voltage-synchronized VSCs[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(7): 8177-8189.
- [45] GROß D, SÁNCHEZ-SÁNCHEZ E, PRIETO-ARAUJO E, et al. Dual-Port grid-forming control of MMCs and its applications to grids of grids[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(6): 4721-4735.
- [46] SUBOTIĆ I, GROß D. Power-Balancing dual-port grid-forming power converter control for renewable integration and hybrid AC/DC power systems[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2022, 9(4): 1949-1961.
- [47] FANG J Y, LI H C, TANG Y, et al. On the inertia of future more-electronics power systems[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 7(4): 2130-2146.
- [48] 唐英杰, 查晓明, 田震, 等. 弱电网条件下虚拟同步机与SVG并联系统的暂态稳定性分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 4020-4029.
TANG Yingjie, ZHA Xiaoming, TIAN Zhen, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator and SVG parallel system under weak grid conditions[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 4020-4029.
- [49] 张芳, 王赫, 李传栋. 含静止无功发生器的直驱风电并网系统稳定性分析及振荡抑制策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(6): 1-8, 17.
ZHANG Fang, WANG He, LI Chuandong. Stability analysis and oscillation suppression strategy of direct-drive wind power grid-connected system with static var generator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(6): 1-8, 17.
- [50] 迟永宁, 江炳蔚, 胡家兵, 等. 构网型变流器: 物理本质与特征[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2): 590-604.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 590-604.



LI Yitong
Ph.D., Professor



AI Cheng
Ph.D. candidate
Corresponding author

李奕瞳

1993—, 男, 博士, 教授, 博导
研究方向为并网电力电子装备稳定控制、电力系统稳定性分析、电力电子电力系统数值计算与仿真等
E-mail: yitongli@xjtu.edu.cn

艾诚(通信作者)

2002—, 男, 博士生
研究方向为并网电力电子装备稳定控制、电力系统稳定性分析
E-mail: aicheng@stu.xjtu.edu.cn

收稿日期 2024-10-08 修回日期 2024-12-12 编辑 陈蔓