

构网型下垂控制中虚拟阻抗的作用、改进及研究前景分析

范宸晖^{1,2}, 秦晓辉², 齐磊¹, 丁保迪², 刘宏志², 孟政吉^{3,4}

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

3. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北省 石家庄市 050021;

4. 河北省能源互联网仿真建模与控制重点实验室(国网河北省电力有限公司电力科学研究院),
河北省 石家庄市 050021)

Analysis of the Role, Improvement, and Research Prospects of Virtual Impedance in Grid-forming Droop Control

FAN Chenhui^{1,2}, QIN Xiaohui², QI Lei¹, DING Baodi², LIU Hongzhi², MENG Zhengji^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

3. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei Province, China;

4. Hebei Key Laboratory of Energy Internet Simulation Modeling and Control (State Grid Hebei Electric Power Research Institutes),
Shijiazhuang 050021, Hebei Province, China)

ABSTRACT: With the acceleration of the construction process of the new power system, the penetration rate of new energy and other power electronic sources in the system continues to increase, the strength of the power grid weakens, and the system security is challenged. Some converters urgently need to adopt grid-forming control, and droop control is a classic grid-forming control strategy. Virtual impedance technology has received widespread attention as an effective improvement method for droop control strategy. With the joint efforts of domestic and foreign researchers, virtual impedance technology has achieved rich theoretical research and practical results and has broad application prospects. This paper analyzes the main positioning and mechanism of virtual impedance in grid-forming droop control, summarizes typical improvement methods and development status of virtual impedance, and combines current research progress and trends to analyze, explore, and judge the research prospects, the key problems may be faced and need to be solved in the future of

virtual impedance technology.

KEY WORDS: virtual impedance; grid-forming(GFM); droop control; function mechanism; research prospects

摘要: 随着新型电力系统建设进程的加速, 新能源等电力电子化电源在系统中渗透率不断提高, 电网强度随之减弱, 系统安全性受到挑战。部分变流器亟需采用构网型控制, 而下垂控制就是一种经典的构网型控制策略; 作为对下垂控制策略的有效改进手段, 虚拟阻抗技术受到广泛关注。在国内外研究人员共同推动下, 虚拟阻抗技术目前已取得较为丰富的理论研究及实践成果, 具有广阔的应用前景。围绕虚拟阻抗在构网型下垂控制中的主要定位及作用机理进行了分析, 对虚拟阻抗的典型改进方法和发展现状进行了梳理总结, 并结合目前的研究进展及趋势, 对虚拟阻抗技术的研究前景、未来可能面临和需要解决的关键问题进行了分析、探讨和研判。

关键词: 虚拟阻抗; 构网型; 下垂控制; 作用机理; 研究前景

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0189

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的逐步推进, 新型电力系统建设进程不断加速, 呈现出高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”型特征, 为电力能源领域带来了诸多新的机遇和挑战^[1-3]。新能源等电力电子化电源在系统中的渗透率不断提

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5500-202355718A-3-3-JC): “新型电力系统构网形态及构网型变流器优化配置研究”。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5500-202355718A-3-3-JC): “Research on New Power System Network Form and Optimization Configuration of Grid-forming Converters”.

高，同步发电机占比减小，系统惯性减小，电网强度减弱，近年来，能够与弱电网相适应的构网型变流器成为相关领域的研究焦点^[4-7]。

构网型变流器可以视为一个串联低阻抗的、幅值相位都受控的电压源，具备可自行构建内电势的能力，其整体控制结构如图1所示。同时，构网型变流器模仿了同步发电机的功率同步特性，可以在无锁相环的条件下有较好的自同步性能。基于上述特性优势，未来随着更多的新能源及储能环节加入电力系统，构网型变流器将有更大的作用发挥空间。

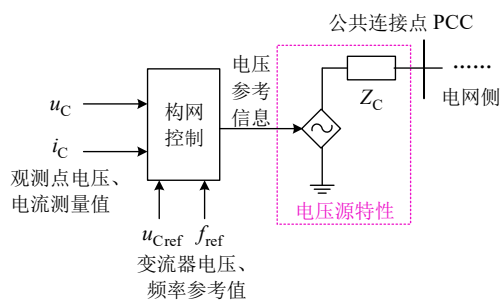


图1 构网型变流器整体控制结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall control structure of a grid-forming converter

根据控制环节的差异，可以将构网型控制策略进一步划分为下垂控制(droop control)、虚拟同步机控制(virtual synchronous generator, VSG)、虚拟振荡器控制(virtual oscillator control, VOC)、匹配控制等，其中尤以下垂控制、虚拟同步机控制受到关注。文献[6]基于下垂控制、虚拟同步机控制的数学共性，尝试构建了构网型控制的统一表达式，并就两者的关联性进行了探讨，但对其他构网型控制策略的特性总结还不够全面。

结合构网型下垂控制在微网中的研究，发现当构网型变流器运行在阻性分量不可忽略的非纯感性电网系统中时，会存在有功功率和无功功率耦合的问题；当多个构网型变流器并联运行时，会存在无功功率分配不均、出现系统环流等问题；此外，构网型变流器的电压源特性也同时带来了过电流等风险。而虚拟阻抗技术的提出和发展，为解决上述问题提供了良好思路。

虚拟阻抗是一种利用电压和电流之间的阻抗关系，在控制环节中添加实现的一种虚拟存在的阻抗。与实际阻抗不同，虚拟阻抗的加入不会对电力系统造成额外的损耗，也不会对工程造价或设备体积带来额外的增加，具有可以重塑变流器输出特性等显著优势。

虚拟阻抗在构网型控制中的应用主要集中在虚拟同步机控制以及下垂控制中，而虚拟同步机策

略又多在对有功功率和电压的控制中引入下垂控制思想，因此虚拟阻抗在虚拟同步机控制和下垂控制中的作用机制在某些方面是相通的。研究发现，下垂控制对虚拟阻抗的依赖性很强，虚拟阻抗技术运用的好坏将直接关系到下垂控制的性能表现，特别是对系统功率和电压的优化控制，更是如此。而对于虚拟同步机控制而言，由于其转子运动方程中含有虚拟转子惯性时间常数 T_J ，其控制效果主要受到 T_J 的影响^[8]，但下垂控制中没有对响应时间进行缓冲和分配的关键变量，而主要依赖于虚拟阻抗。因此，虚拟阻抗在下垂控制中的作用和定位也更为重要和突出。综上，即使是在虚拟同步机等新型控制技术迅速发展和较为流行的当下，下垂控制也仍然值得重点分析和再认识。为了使讨论更加聚焦，本文将重点围绕构网型下垂控制中的虚拟阻抗技术展开。

近年来，国内外相关研究人员在虚拟阻抗的原理分析、技术创新、应用场景等领域开展了持续攻关，取得了显著成果，但各研究团队间的侧重点各有不同：

奥尔堡大学 Josep M. Guerrero 教授团队主要针对虚拟阻抗在微网领域的应用开展研究^[9-12]；阿尔伯特大学 Yunwei Li 教授团队的研究涉及到电能质量、电网支撑、电压不平衡补偿等多个角度^[13-18]；南京航空航天大学阮新波教授团队主要围绕弱网系统中变流器的稳定性和适应性开展研究^[19-23]；西安交通大学王跃教授团队主要围绕故障穿越、扰动稳定性、输出阻抗特性、功率分配优化等工作开展研究^[24-27]；湖南大学罗安院士团队研究内容覆盖面广，在系统鲁棒性、变流器并联运行、功率分配精度、电压补偿、环流分析、纹波抑制等领域均颇有建树^[28-30]。

随着研究层次的不断深入和工程建设的实际需要，在传统虚拟阻抗的基础上，文献[31-37]等进一步提出了“虚拟负阻抗”、“自适应虚拟阻抗”、“直流虚拟阻抗”、“暂态虚拟阻抗”等概念，对虚拟阻抗在系统中的适应性进行了改进提升，并对其作用发挥能力进行了更深层次的挖掘，相关具体介绍将在后文展开。

虚拟阻抗的作用场景丰富，研究分支众多，但目前少见对虚拟阻抗在构网型下垂控制中的作用、改进及研究前景的整合分析。2017年，华北电力大学袁敞等在文献[38]中对虚拟阻抗在微电网并网变流器中的应用进行了相对全面的综述，但是推导还不够详尽，特别是对多构网型变流器并联运行时的

情况分析还不够透彻,也没有对虚拟阻抗的设计方法进行说明,另外由于虚拟阻抗在近些年已有较为成熟的改进措施和明显发展,因此本文尝试重新对相关问题进行较为全面的分析和阐述。

本文首先在第1节分析了虚拟阻抗在系统下垂控制中的主要作用机理,从有功和无功功率解耦、并联系统无功功率分配、环流抑制、故障过电流限制、谐波及非工频振荡抑制、滤波器电气谐振抑制、励磁涌流抑制七个方面进行了推导说明;然后在第2节介绍了虚拟阻抗的改进方法及发展现状,特别是对目前已提出的虚拟阻抗在参数整定方法和控制思路上的改进进行了归纳梳理;接着在第3节结合虚拟阻抗技术的前沿进展及新型电力系统发展趋势,探讨了虚拟阻抗的研究前景及未来可能面临和需要解决的关键问题;最后在第4节进行了总结,旨在推动虚拟阻抗技术的发展,并为相关研究人员了解虚拟阻抗技术提供较为全面和有益的参考。

1 虚拟阻抗的主要作用机理

1.1 有功无功功率解耦

下垂控制是构网型变流器的主要控制策略之一,通过采集计算变流器的输出功率,再利用有功功率-频率、无功功率-电压之间的下垂特性,得到电压电流双闭环控制中的电压参考值。系统整体结构及下垂控制环节框图如图2所示。

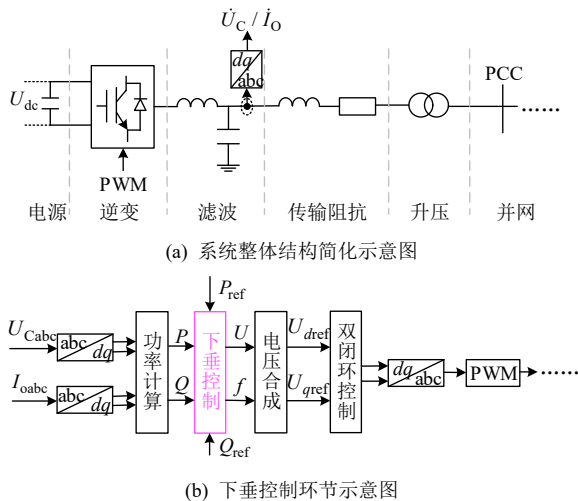


图2 系统整体结构及下垂控制环节框图
Fig. 2 System overall structure and droop control block diagram

传统的下垂控制适用于纯感性(或纯阻性)的电网环境,这是因为当电网处于纯感性(或纯阻性)环境时,有功功率和无功功率之间几乎不存在耦合。但在阻感性电网环境中,有功、无功功率之间存在着明显的耦合关系,这使得传统下垂控制的控制精度变差,难以充分发挥其作用效果,甚至还可能导

致系统失稳。下面对相关机理进行分析。

将变流器输出等效为图3所示电路结构。其中, $U_L \angle 0^\circ$ 为公共连接点(point of common coupling, PCC)电压,设定其相位角为参考相位角, $U_C \angle \delta$ 为变流器端输出电压, $Z \angle \theta$ 为变流器输出阻抗与变流器到公共连接点PCC之间的线路阻抗之和,本文统称为传输阻抗, S 为流入网侧系统(流入PCC点)的复功率,包含有功功率 P 和无功功率 Q 。

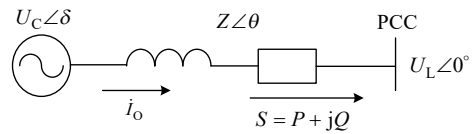


图3 变流器输出等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of converter output

根据图3,变流器的输出电流 \dot{I}_O 可表示为

$$\dot{I}_O = \frac{U_C \angle \delta - U_L \angle 0}{Z \angle \theta} = \frac{U_C \angle \delta - U_L \angle 0}{R + jX} \quad (1)$$

向网侧系统注入的复功率 S 为

$$S = P + jQ = \dot{U}_L \dot{I}_O^* \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),可得:

$$\begin{cases} P = \frac{U_L [R(U_C \cos \delta - U_L) + U_C X \sin \delta]}{R^2 + X^2} \\ Q = \frac{U_L [X(U_C \cos \delta - U_L) - U_C R \sin \delta]}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (3)$$

当传输阻抗近似呈现纯感性时,即 $X \gg R$, $R \approx 0$,则式(3)可简化为

$$\begin{cases} P = \frac{U_L U_C \sin \delta}{X} \\ Q = \frac{U_L (U_C \cos \delta - U_L)}{X} \end{cases} \quad (4)$$

一般情况下,变流器输出电压 \dot{U}_C 与PCC点处电压 \dot{U}_L 之间的功角差 δ 很小,可近似认为 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$,对式(4)进一步化简得:

$$\begin{cases} P = \frac{U_L U_C \delta}{X} \\ Q = \frac{U_L (U_C - U_L)}{X} \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)求微分,并考虑到 δ 很小,认为 $\delta \approx 0^\circ$,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{U_L U_C}{X} \\ \frac{\partial P}{\partial U_C} = \frac{U_L \delta}{X} \approx 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial U_C} = \frac{U_L}{X} \end{cases} \quad (6)$$

由此可知，当系统处于纯感性环境时，流入网侧的有功功率 P 主要取决于变流器输出电压与网侧电压之间的功角差 δ ；无功功率 Q 主要取决于变流器输出电压幅值 U_c ，此时的有功、无功功率之间几乎不存在耦合。也有一些文献^[39]在上述推导过程中将功率观测点选取在变流器交流滤波电容出口处，而非 PCC 点，虽然相关表达式有所差异，但最终的分析结论相同，如附录 A 所示。

采取类似的思路，可分析得到在纯阻性电网环境下的有功无功功率耦合特性，有功功率 P 主要取决于变流器输出电压幅值 U_c ；无功功率 Q 主要取决于变流器输出电压与网侧电压之间的功角差 δ ，此时的有功、无功功率之间也几乎不存在耦合，具体推导过程见附录 B。

但是，如果电网呈现阻感特性，根据式(3)，同时考虑 $\sin \delta \approx \delta$ ， $\cos \delta \approx 1$ ，可得：

$$\begin{cases} P = \frac{U_L[R(U_C - U_L) + U_C X \delta]}{R^2 + X^2} \\ Q = \frac{U_L[X(U_C - U_L) - U_C R \delta]}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (7)$$

不难看出，此时无论 P 和 Q 分别对 δ 、 U_c 中的哪一个变量求偏导，结果都不为零，有功、无功功率之间存在明显耦合关系。

此外，如果系统受到大扰动，其功角也将发生改变，此时就未必满足上述推导中对于小功角的假设。在这种情况下，传统的下垂控制不再直接适用。

近年来，清洁能源、分布式电源(distribution generation, DG)等领域的发展使微电网备受关注。事实上在微电网建设过程中，由于系统容量以及电压等级等因素，电网呈现阻感特性是较为常见的。例如表 1 中的中低压等级系统，就是阻感性环境。

表 1 各电压等级线路典型阻抗参数^[40]
Table 1 Typical impedance parameters of each voltage level line^[40]

线路类型	电阻 R (Ω/km)	电抗 X (Ω/km)	额定电流 I/A	阻感比 R/X
低压	0.642	0.083	142	7.70
中压	0.161	0.190	396	0.85
高压	0.060	0.191	580	0.31

针对这一情况，有学者提出可以采用加入虚拟负电阻或虚拟电感的方式^[31,39,41-49]，对传统下垂控制策略进行优化。虚拟负电阻可以抵消系统中原有的阻性分量，虚拟电感可以在原有感性分量的基础上对其进行加强。文献[38]对这两种实现方式进行了可行性推导并进行了优劣势对比。但无论采取何种方式，其本质上都是为了使系统环境向纯感性改变，以更好地适用下垂控制策略。

将加入的虚拟阻抗表示为 $Z_V = R_V + jX_V$ ， R_V 为虚拟电阻， X_V 为虚拟感抗。以引入虚拟电阻 R_V 和虚拟电感 L_V 为例，其控制框图如图 4 所示，可结合图 2 辅助理解。图中， U_{Cd}^* 和 U_{Cq}^* 分别代表未引入虚拟阻抗前，变流器输出电压的 d 轴和 q 轴分量参考值； U_{Cdref} 和 U_{Cqref} 分别代表引入虚拟阻抗后，变流器输出电压的 d 轴和 q 轴分量参考值； U_{Cd} 和 U_{Cq} 分别代表变流器输出电压实际值的 d 轴和 q 轴分量。

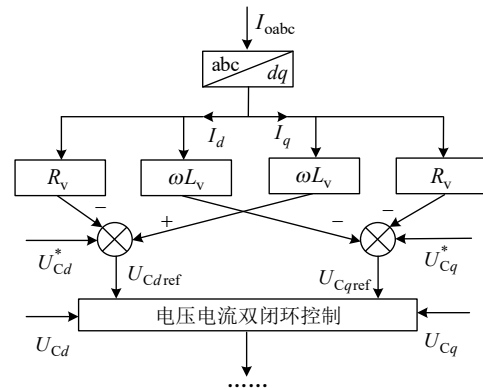


图 4 引入虚拟阻抗控制框图

Fig. 4 Introduction of virtual impedance control block diagram

1.2 并联系统功率协调分配

1.2.1 有功功率分配

通过上文的分析，在感性环境下，变流器输出的有功功率 P 可通过功角 δ 调节，而功角 δ 与变流器输出角频率 ω 之间存在如下关系：

$$\delta = \int \omega dt = \int 2\pi f dt \quad (8)$$

即功角 δ 可由变流器输出角频率 ω 经过积分环节计算得到，进而也可通过控制系统频率 f 来控制变流器输出的有功功率。

在传统的感性下垂控制中，有功功率 P 和频率 f ，无功功率 Q 和电压幅值 U_c 之间的下垂关系如图 5 所示。

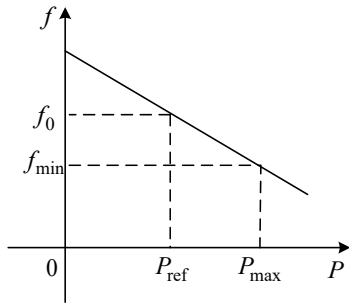
列写下垂控制表达式为

$$\begin{cases} f = f_0 + K_p(P_{ref} - P) \\ U_c = U_{C0} + K_q(Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (9)$$

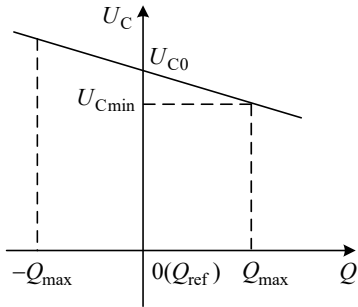
式中： f 、 U_c 分别为变流器输出频率、输出电压幅值的调节参考值； f_0 、 U_{C0} 分别为变流器输出频率、输出电压幅值的初始值(额定值)； P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为变流器输出有功、无功功率的参考值； P 、 Q 分别为变流器输出的有功、无功功率实际值； K_p 、 K_q 分别为有功下垂系数和无功下垂系数。

式(9)也可推广至两变流器等多变流器并联运行系统。以两变流器并联运行系统为例，其等效电

路模型如图6所示。



(a) 有功功率-频率的下垂关系示意图



(b) 无功功率-电压的下垂关系示意图

图5 有功-频率、无功-电压下垂关系示意图
Fig. 5 Schematic diagram of active-frequency and reactive-voltage droop relationship

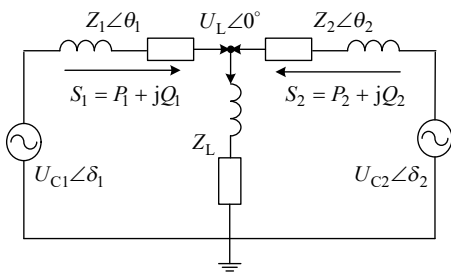


图6 两变流器并联运行等效电路模型
Fig. 6 Equivalent circuit model for parallel operation of two converters

当系统稳定运行时，频率作为全局变量，各变流器输出频率即工作频率相同。此时如果设定各变流器的参考频率相同，那么各变流器承担的有功功率将根据各自的有功下垂系数得到较理想的分配。特别地，当各变流器设定的有功下垂系数相同时，其输出的有功功率也相同，系统有功功率可以实现良好均分。

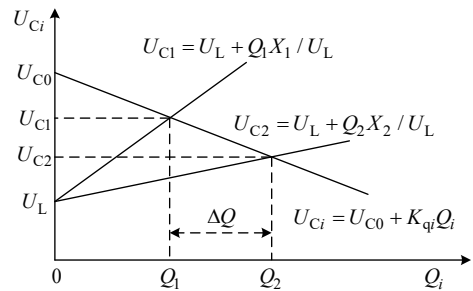
1.2.2 无功功率分配

在感性电网环境下，将式(9)代入式(5)，可得：

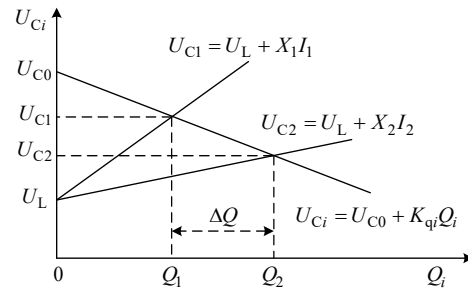
$$Q = \frac{(U_{C0} + K_q Q_{ref})U_L - U_L^2}{X + K_q U_L} \quad (10)$$

由式(10)可知，变流器输出的无功功率主要受无功下垂系数 K_q 和传输阻抗中感抗 X 的影响。进一步地，在多变流器并联运行系统中， K_q 和 X 对无功功率的合理分配影响很大。

有学者在相关文献中绘制了如图7所示的两变流器并联运行时的电压-无功下垂特性曲线，希望以求解图像交点的方式求取系统的稳态运行点，但图7中的这两种表示方法其实是不准确甚至是错误的。图7(a)在无功功率的表达上忽略了滤波电抗及线路感抗等联系电抗所消耗的无功功率，混淆了源侧及荷侧端口的无功功率，该图下垂曲线表达式中的无功功率是指变流器输出(源侧)的无功功率，而变流器输出电压曲线表达式中的无功功率是指流入PCC点(荷侧)的无功功率，这是两个完全不同的变量，无视其差异而求解是毫无意义也是完全错误的。图7(b)只能起到示意的作用，一方面是因为变流器输出电压曲线表达式中的电流变量与横坐标所代表的无功功率并不能简单地直接等同，另外这样做也忽视了电压对端口无功的影响，因此也是不合适的。



(a) 源侧、荷侧端口的无功功率发生混淆



(b) 表达式中变量与坐标轴不符且忽视电压对无功的影响

图7 两变流器并联运行时电压-无功下垂控制曲线的两种错误表示方法

Fig. 7 Two erroneous representation methods for voltage-reactive droop control curves during parallel operation of two converters

在实际系统中，变流器接入位置多变，与公共连接点之间的电气距离各异，加上运输线路本身的差异性，因此各变流器对应的传输阻抗 $Z \angle \theta$ 很难保证完全一致，进而会引起线路上电流、变流器输出电压等的不同，这些因素将共同导致并联运行的变流器之间的无功功率很难实现理想化分配。各变流器传输阻抗的感抗值越接近，无功偏差越小。特别地，当各变流器对应的传输阻抗完全一致，且选取相同的无功下垂系数时，系统的无功功率将实现

良好均分。因此，有学者通过引入虚拟阻抗以缩小各变流器传输阻抗之间的差异，改善无功功率分配情况，也可根据不同工况实现按容量或按所需求的比例进行分配。提升无功功率分配精度，是虚拟阻抗的主要研究和重要应用领域之一。然而，本文研究团队发现虚拟阻抗的加入可能会导致变流器交流滤波电容出口处原本的无功-电压下垂特性发生重塑，其中具体的机理分析及仿真验证，将另文详述，这里不再展开。

1.3 并联系统环流抑制

根据图 6 可列出如下电路方程：

$$\begin{cases} U_L \angle 0^\circ = U_{C1} \angle \delta_1 - Z_1 \dot{I}_1 \\ U_L \angle 0^\circ = U_{C2} \angle \delta_2 - Z_2 \dot{I}_2 \\ \dot{I}_L = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{U_L \angle 0^\circ}{Z_L} \end{cases} \quad (11)$$

式中： \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 是两个变流器各自的输出电流； \dot{I}_L 为负载 Z_L 上流过的电流。

在图 6 中，当两变流器输出电压不完全相等时，必然在外圈大环路中存在由此电压差所引起的环流分量，将这一环流分量记作 \dot{I}_H 。对大环路列写 KVL 方程，可得 \dot{I}_H 的表达式如下：

$$\dot{I}_H = \frac{U_{C1} \angle \delta_1 - U_{C2} \angle \delta_2}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

当变流器运行在感性电网环境时，同时考虑 δ 较小，式(12)可近似简化为

$$\dot{I}_H \approx \frac{U_{C1} \angle \delta_1 - U_{C2} \angle \delta_2}{X_1 + X_2} \approx \frac{U_{C1} - U_{C2} + jU_{C1} \delta_1 - jU_{C2} \delta_2}{X_1 + X_2} \quad (13)$$

由式(13)可知，当两变流器输出电压幅值和相角均相同时，系统环流为 0，反之系统存在环流。但是在没有相互通信的情况下，欲保持两变流器输出电压的幅值和相位都一致，难度很大。一种比较可行的方法是，两变流器在公共连接点电压的基础上，通过调整虚拟阻抗参数，使得各自的输出电压趋于一致。

当然，也可以对图 6 电路结构中的两个网孔列写 KVL 方程，当两网孔电流中的非环流分量一致时，环流 \dot{I}_H 还可以表示为

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{I}_1 - \dot{I}_2}{2} = \frac{U_{C1} \angle \delta_1 - U_L \angle 0}{2Z_1} - \frac{U_{C2} \angle \delta_2 - U_L \angle 0}{2Z_2} \quad (14)$$

在感性电网环境中，当两变流器控制参数一致、传输阻抗一致时，同时考虑 δ 较小，可将环流表达式简化为

$$\dot{I}_H \approx \frac{(U_{C1} \delta_1 - U_{C2} \delta_2) - j(U_{C1} - U_{C2})}{2X_1} \quad (15)$$

当变流器输出电压的幅值相同但相角不一致时，式(15)只有实部不为零，即此时的环流主要为有功特性分量，且环流大小随相角差增大而增大，随传输阻抗中的感性分量增大而减小。可以通过提高传输阻抗中的感性分量或提高相角同步性减少环流。

同理，当变流器输出电压的相角相同且较小，但幅值不一致时，式(15)只有虚部不为零，此时的环流主要为无功特性分量，该环流大小随幅值差增大而增大，随传输阻抗中的感性分量增大而减小。可以通过提高传输阻抗中的感性分量或提高幅值同步性减少环流。

由于系统频率的全局一致性较好，变流器输出电压的相角将趋于一致且较小，因此系统环流中的有功特性分量较低，无功特性分量为环流中的主要分量，因此部分研究者对“无功环流”开展研究^[34,50-52]。变流器输出电压差异变大、传输线路阻抗差异变大、无功功率分配差距变大都会造成系统环流变大，对系统运行产生干扰，严重时甚至还将对变流器硬件造成损坏。根据上述分析，通过加入虚拟阻抗，改善输出阻抗特性，可以较好地增强输出同步性，减小环流。

1.4 故障过电流抑制

当系统发生短路故障时，公共连接点电压迅速跌落，但由于采样时间、控制反馈时间等因素的影响，系统调节具有一定的延时性和滞后性，变流器输出电压不能迅速做出调整，这就导致这一较大压差需要由滤波器和线路阻抗承担，变流器将承受包含非周期性直流偏置分量、周期性故障交流分量的暂态冲击和稳态过载电流。有研究表明，电网电压跌落程度越深，系统所遭遇的冲击电流就越大，甚至可达系统正常运行时电流的 7 倍左右^[53]。与具有 6~8pu 过流能力的同步发电机不同，构网型并网变流器的故障电流应被限制在正常并网运行电流的 1.5~2pu 以内^[54-57]，特别是在变流器高度电力电子化后，其承受过载电流的能力严重受限，故障过电流将对电网安全稳定运行构成严重威胁。

目前构网型变流器对电网故障过电流的常见抑制方法有两种^[58-59]：

一种是在故障时将变流器的控制模式从构网型控制切换为跟网型控制^[58]。这种方法可以通过在电压电流双闭环控制中增加瞬时饱和限制器、锁存限制器等电流限制模块实现^[60]，但是故障并网电流

达到饱和和可能会影响电力系统的暂态稳定性^[61-62]；也可以通过在控制环节加入一套备用的跟网型控制系统实现^[63-64]，当故障发生时，主动切换到跟网型控制模式，引入锁相环以保持变流器在低压穿越期间与电网的同步性^[65]，但锁相环的加入可能会在弱电网中引入谐振^[66]。总体而言，这种过电流抑制方法在一定程度上损失了构网型变流器的主动支撑潜力和构网能力优势^[67]。

另一种是通过加入虚拟阻抗抑制过电流^[59]，文献[59]从理论上分析了这种方法的可行性。此外，虚拟阻抗还有助于避免构网型变流器陷于“饱和”或“闭锁”状态^[24,53]。因此虚拟阻抗在过电流抑制方面具有明显优势和应用价值。

简单理解，可以近似认为加入虚拟阻抗的效果等同于在系统中串联了传输阻抗，示意图如图8所示，那么此时线路上的电流 i'_o 变为

$$i'_o = \frac{U_c \angle \delta - U_L \angle 0}{Z \angle \theta + Z_v \angle \theta_v} = \frac{U_c \angle \delta - U_L \angle 0}{R + jX + R_v + jX_v} \quad (16)$$

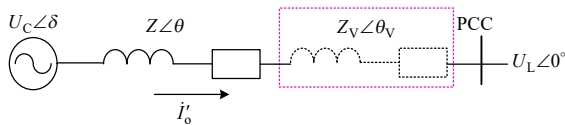


图8 引入虚拟阻抗后系统等效示意图

Fig. 8 Equivalent schematic diagram of the system after introducing virtual impedance

式(16)与式(1)相比，等效传输阻抗增加，抑制了系统过电流峰值并可防止电流变化率过高，同时可以降低电压参考值，避免较大的电流基准，从而抑制过电流的发展，加速故障电流的消除。这也是虚拟阻抗限制过电流的主要原理。文献[68]通过系列仿真验证了虚拟阻抗越大，暂态冲击电流越小的结论，但是没有给出具体的参数设计方法。需要注意的是，虚拟阻抗取值并不是越大越好，研究表明，过大的虚拟阻抗取值可能会引发变流器谐振^[69]等问题。本文研究团队发现，流过虚拟阻抗上的电流在设计时常常被刻意反向(网侧流向阀侧)，以达到降低电压参考值的目的，此时就不能再简单等效地认为是以串联方式增加了系统线路阻抗，而是增加了源侧等值内抗。

需要说明的是，这里下垂控制中对虚拟阻抗的应用方法，与虚拟同步机控制中在内电势和变流器端口间串入虚拟阻抗的应用方法，是两种不同的技术路线。本文所论述的下垂控制，本质是想要通过调节虚拟阻抗来改变变流器交流滤波电容处的电压控制目标值，进而实现过电流抑制；而虚拟同步机控制在内电势和变流器端口之间直接插入虚拟

阻抗，是想要通过对电流内环的控制，以虚拟阻抗为媒介，使其呈现构网控制特性，换句话说，是想要根据电压和电流静特性之间的一一对应关系，用电流源的控制方法来实现对电压源外特性的模拟。目前，这种在虚拟同步机中加入虚拟阻抗的控制方法获得了业界较为广泛的理解和应用，但这种控制方法只能在一定的时间尺度上实现对电压源外特性的拟合，在极小的时间尺度上，从电压变化和电流变化的策动或因果关系来看，仍然不能做到真正的物理模拟。

1.5 谐波与非工频振荡抑制

大量非线性负荷和电力电子设备中的非线性元件使电网中存在谐波分量，电压质量很难维持在理想状态，而采用下垂控制的并网变流器对电网电压的变化更为敏感^[70]，因此电网谐波的存在对变流器的运行是十分不利的。

基于下垂控制的谐波抑制方法，包括改进的下垂控制器法、电压电流控制器法、虚拟阻抗法以及比例谐振控制器法等^[70-77]。本文主要对虚拟阻抗法进行研究，用合理的控制手段加入虚拟阻抗，在不影响基波输出阻抗的前提下，通过增大谐波阻抗等方式减小谐波电流，可以较为有效地解决上述问题^[78]。

参考图8的系统等效示意图，以 h 次谐波分量为例，设 $\dot{U}_c(h)$ 、 $\dot{U}_L(h)$ 、 $\dot{I}_o(h)$ 分别代表变流器输出电压中的 h 次谐波分量、电网电压中的 h 次谐波分量，以及线路上流过的 h 次谐波电流。参照式(16)可得到针对于 h 次谐波电流的表达式(17)，由此可知适当增加虚拟阻抗可以减小谐波电流。

$$\dot{I}_o(h) = \frac{\dot{U}_c(h) - \dot{U}_L(h)}{Z \angle \theta + Z_v \angle \theta_v} \quad (17)$$

文献[79]最早在有源滤波系统中通过构造虚拟电感实现谐波滤除，文献[80]首次提出在电压型并网变流器中使用虚拟阻抗抑制谐波，文献[81]以间接电流控制逆变器为例，用串联虚拟阻抗补偿死区效应的同时，抑制电网背景谐波。文献[82]对比了各种阻感特性下虚拟谐波阻抗的不同控制方法，并针对空载和容性负载工况进行了分析，但没有对阻性和感性负载进行讨论。

现阶段通过虚拟阻抗实现谐波抑制的作用过程主要包括两步，首先对变流器输出电流进行各次谐波分离，再通过虚拟阻抗对各次谐波电流分别补偿。当虚拟阻抗产生的压降与各次谐波电流带来的压降相互抵消，就实现了谐波抑制^[75,83]。但是由于在做谐波补偿时，需要分多次对各次谐波分别补偿，因此在实际应用中较为复杂，如图9所示^[38]。

类似的思路同样可以应用于非工频阻抗特性重塑及非工频振荡抑制等研究。文献[4]从低频振荡、次同步振荡、工频振荡、高频及谐波振荡4个角度对构网型变流器的小信号稳定性进行了十分详尽的分析，为构网型变流器的工程应用提供了基础理论支撑。文献[84]等也对相关问题进行了详细论述，这里不再赘述。

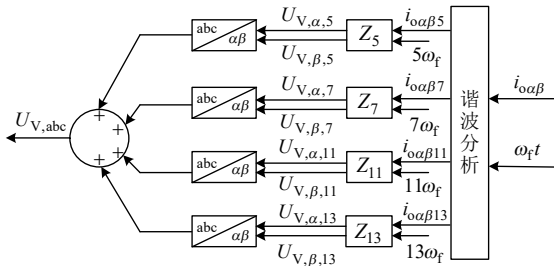


图9 虚拟阻抗实现谐波抑制原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of virtual impedance for harmonic suppression principle

1.6 滤波器电气谐振抑制

滤波器的存在以及并联系统中各滤波器的交互作用都可能会引发谐振现象。以常见的LCL滤波器为例，滤波电感和电容分别记为 L_1 、 L_2 、 C ，那么

在谐振频率 $f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}$ 处，将产生谐振尖峰，放大线路中的谐波，且相频特性会发生 -180° 跳变，影响变流器安全稳定运行^[85]，严重的还将引起变流器无故障跳闸。

目前针对谐振抑制已有较多成熟方法^[86-93]，常见的谐振尖峰抑制方法有两大类，即有源阻尼法^[86,89-93]和无源阻尼法^[85,88,94-95]。构造虚拟阻抗属于有源阻尼法，在滤波电感或电容上串并联实际电阻属于无源阻尼法。从能量损耗的角度考虑，采用在谐振频段加入虚拟阻抗的方案是更优的选择，可以达到与无源阻尼同样的作用效果^[38,96]。

在控制环节中加入虚拟阻抗的一种典型有源阻尼控制框图如图10所示。图中 i_h 为LCL滤波器变流器侧支路上的电流， u_c 为滤波电容电压，变量下角标“ h ”代表 h 次谐波分量，“ $1/K_{PWM}$ ”为等效比例放大环节。

在控制环节中加入虚拟阻抗的一种典型有源阻尼控制框图如图10所示。图中 i_h 为LCL滤波器变流器侧支路上的电流， u_c 为滤波电容电压，变量下角标“ h ”代表 h 次谐波分量，“ $1/K_{PWM}$ ”为等效比例放大环节。

1.7 励磁涌流抑制

在采用构网型下垂控制的中低压微网中，变流器输出经过滤波环节后，常常还需要经过升压变，然后才会并入电网，当电网电压发生跌落时，会在变压器中引起磁通偏量，如果在电网恢复正常前，磁通偏量无法消除，那么就会在变压器中引起励磁涌流。有学者提出借助直流虚拟阻抗，在不影响变压器中交流流量的情况下，加速变压器磁通偏量消耗^[38,97-99]。

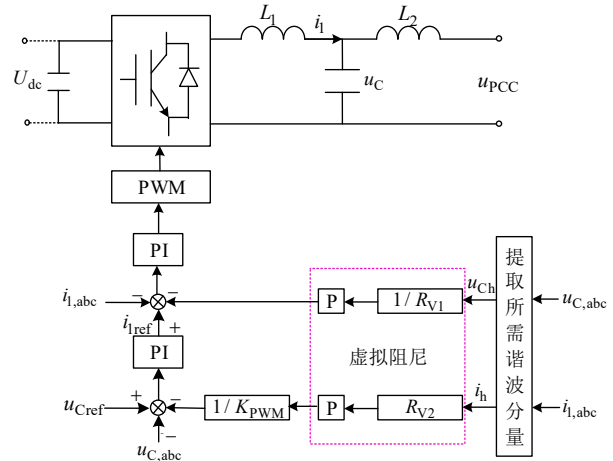


图10 典型的有源阻尼控制框图

Fig. 10 Typical active damping control block diagram

由于相关研究较少，且“直流”虚拟阻抗也非本文重点讨论内容，因此这里不再展开讨论。

2 虚拟阻抗设计方法的改进及发展

现实的电力系统工况复杂，负荷投退等情况都会造成电网状态改变，传统固定取值的虚拟阻抗不再能满足系统运行需求，因此有学者针对虚拟阻抗的参数设计方法及相应的控制策略进行了研究和改进，提出了“动态虚拟阻抗”、“自适应虚拟阻抗”等概念。这些方法既是对虚拟阻抗技术的改进，同时也是对下垂控制策略的改进。

总体而言，这些改进主要从以下3方面展开：

1) 对虚拟阻抗参数整定方法进行改进，以使虚拟阻抗的取值可根据系统运行状况做出自适应调节。这也是目前技术演变较为丰富、研究成果更为成熟的一个领域。

2) 对虚拟阻抗相关控制策略的进一步拓展和延伸，例如在控制环节中加入电压补偿，对引入虚拟阻抗带来的额外压降进行合理补偿，减小其对系统电能质量等方面带来的影响，进而改善虚拟阻抗的整体作用效果。

3) 探索虚拟阻抗的不同实现途径，例如基于传统串联式虚拟阻抗不易确定取值的情况，有学者提出了并联式的虚拟阻抗；此外，虚拟阻抗在时域和频域下的控制环节中也有着不同的实现途径。

下面以几种已有的典型改进方法为例，分别介绍虚拟阻抗技术在以上3个方面的发展。

2.1 参数整定方法的改进

在对虚拟阻抗的参数整定方面：

文献[100]给出了一种静态虚拟阻抗参数优化方法，并进一步提出了可动态调节的虚拟阻抗参数优化策略，对抑制环流有较明显效果，但是没有考虑到谐波及谐振干扰对所提策略的影响。

文献[101]针对变流器并联运行的工况,根据变流器分担的无功功率比值与各变流器对应等效线路阻抗比值之间呈近似反比的规律,以实时无功功率分配精度为指标,提出一种分段式虚拟阻抗设计方法,但这样做的弊端在于取值优化不够精确。这种虚拟电感 L_V 的取值表达式如下(单位:mH), K_Q 为变流器分担的无功功率比值。

$$L_V = \begin{cases} 1.2, & K_Q \leq 1.2 \\ K_Q, & 1.2 < K_Q < 2.0 \\ 2.0, & K_Q \geq 2.0 \end{cases} \quad (18)$$

文献[102]的作者关注到了虚拟阻抗在抑制故障过电流时的退出机制,在文献[102]中指出为了给外环控制量提供充分的恢复时间,避免因其未完全恢复至目标值而导致再次产生暂态冲击电流,虚拟阻抗在退出时可采用指数衰减形式,而不是在故障清除时刻直接完全退出,并给出了所提时变虚拟阻抗的取值表达式,如式(19)所示。但这种方法只适用于为了应对故障过电流而临时投入的虚拟阻抗,在实际系统中,虚拟阻抗一般还应兼具有前文提到的功率解耦、功率分配优化等功能,因此该取值方法的适用性还有待继续改良。

$$Z_V = \begin{cases} 0, & t \leq t_0 \\ R_V + j\omega L_V, & t_0 < t < t_1 \\ (R_V + j\omega L_V)e^{-(t-t_1)/T}, & t \geq t_1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: t_0 为故障发生时刻; t_1 为故障清除时刻; T 为虚拟阻抗衰减时间常数。

2.2 控制策略的延伸

在虚拟阻抗的控制策略方面:

文献[103]针对交直流混合微电网中功率波动的问题,提出一种复合虚拟阻抗与模糊算法相结合的控制策略,并在建模中考虑了储能环节对系统的影响,对未来源网荷储一体化运行有一定的借鉴意义。

此外,当系统无功功率较为缺乏时,虚拟阻抗的加入会导致变流器输出电压及其参考值有所下降,与公共连接点之间的电压差距增加,这会对电能质量及无功分配造成不利影响,文献[101,104]等都对虚拟阻抗带来的额外压降补偿方法进行了介绍。虽然控制框图各有不同,但本质上都是先计算出虚拟阻抗产生的压降,再将这部分压降增补至输出电压及其参考值中。

“倒下垂”控制是一种应用于跟网型变流器的与下垂控制类似的控制策略^[105],这种控制策略的好处在于当系统频率和电压下降时,可以增加跟网

型变流器输出的有功无功功率,进而与构网型变流器的功率下垂调节能力有较好的配合效果。文献[106]提出一种将自适应虚拟阻抗技术应用于“倒下垂控制”的控制策略,可以实现微网系统无功功率在构网型与跟网型变流器之间的均分控制,具备即插即用能力,并通过仿真算例对所提方法进行了验证。相比于其他跟网型控制策略,这样做的明显优势在于可以使跟网型变流器主动参与功率二次调节,为后续研究构网/跟网型异构变流器共同参与电网协调运行提供了思路。

2.3 实现途径的探索

在虚拟阻抗的实现途径上:与传统的串联虚拟阻抗不同,文献[107]从变流器电压跟踪环节入手,提出了一种等效并联虚拟阻抗,并进一步提出了虚拟电压比例系数自适应控制策略。这种策略的优势在于规避了传统串联虚拟阻抗取值不易确定的问题,在提高功率分配精度、抑制环流的基础上,能够兼顾变流器输出电压的外特性,并在双机和三机系统中进行了验证。

3 现有研究的不足及未来可能面临的问题

在学术界和工业界的共同努力下,虚拟阻抗技术已日趋成熟,本节将继续探讨构网型下垂控制中虚拟阻抗技术的现有不足以及未来可能面临和需要解决的问题,以期为相关研究人员提供参考。

3.1 虚拟阻抗的取值、控制方式和作用效果的协调及评估

正如本文第1节所分析的,虚拟阻抗在系统中的功能非常丰富,但目前每个具体的研究基本上都只聚焦于其中的一到两个方面,因此未来应如何平衡虚拟阻抗在系统中多种功能的作用效果,协调和选取虚拟阻抗作用效果的侧重点,是否会存在控制方式或作用效果上的冲突,对系统稳定性有无影响,以及如何量化评估虚拟阻抗的作用效果,都是值得探索的问题。

在对虚拟阻抗的取值上,目前虽然已经有自适应虚拟阻抗等改进后的参数设计方法,但是如果虚拟阻抗取值受到系统实时电压、电流、线路阻抗等特性动态变化的影响,产生过于频繁的参数变化,是否会对系统电能质量等造成危害,是否应该为虚拟阻抗的参数变化设定合理的灵敏度和阈值,尚无明确结论。虚拟阻抗的取值还可以考虑与预测模型或控制算法相结合,以提高虚拟阻抗的设计精度。

另外正如前文所提到的,本文研究团队已发现虚拟阻抗的加入可能会导致变流器交流滤波电容

出口处原本的无功-电压下垂特性发生重塑,值得读者注意。

现有自适应虚拟阻抗的控制策略对中央控制器实时通信功能的可靠性要求较高,一旦通信功能受限,虚拟阻抗的作用效果将难以得到保证,这就削弱了下垂控制原本对通信低依赖的优势,因此需要进一步研究是否有更稳妥的解决途径。

3.2 系统中引入虚拟阻抗的实现方法研究

以引入虚拟电感为例,实际上有多种引进方式。在时域中,可以根据电感的电压电流关系 $u_L = L \frac{di_L}{dt}$, 采用电流微分环节与电感相乘的方法实现,但是在对电流进行微分之前需要先滤除谐波,滤除谐波时又可以通过带通滤波器或低通滤波器等途径实现;在频域中,根据电感电压超前电流 90° 的关系,可以采用两个高通滤波器串联的方式实现这种特性,再根据截止频域处的幅值关系乘以系数,再乘以频域电感 $j\omega L$ 即可。

但需要指出的是,在实现虚拟阻抗的不同功能时,需要选取对应的合适的引入方法,并不是各种方法在所有情况下都可通用。例如文献[108]所提的限流方法,为了确保其限流功能实现,所添加的虚拟阻抗就不能通过串联高通滤波器的方式实现。

现有研究中对虚拟阻抗引入方法的总结、适用条件的分析及效果对比并不多见,不同方法引入的虚拟阻抗究竟会对系统稳定性等方面产生何种影响等相关的研究还有待进一步开展。

3.3 虚拟阻抗的应用场景探索

虚拟阻抗的应用场景还有待进一步开发和丰富。根据已有研究,虚拟阻抗不仅在下垂控制中有重要作用,对于虚拟同步机控制等其他方法也有极强的适用性和推广价值,虚拟阻抗也已被应用到储能变流器^[109]、快速充电站层级控制^[38,110]等领域。但由于本文主要聚焦于构网型下垂控制中的虚拟阻抗技术研究,因此未对其他应用场景进行分析介绍。

此外,目前对于虚拟阻抗、下垂控制等的研究和实践还主要集中于微网,可以进一步探索虚拟阻抗在大型微电网及大电网环境中的定位、取值及控制方法、应用场景,例如是否可以借助对虚拟阻抗的更优控制,减少系统对电流环幅值跟踪和电流限幅环节的依赖,更好地保留构网型变流器的电压源特性等诸多问题还需要更深层次的研究和尝试。

4 结语

本文结合国内外大量相关研究文献和研究成

果,从有功无功功率解耦、无功功率分配、系统环流抑制、故障过电流限制等七方面对虚拟阻抗的作用机理进行了分析;站在虚拟阻抗视角,探讨了不同构网型控制策略在实现构网目标时,所用方法和途径上的本质差异;介绍了目前已有的对虚拟阻抗参数整定和控制思路的典型改进方法;并结合目前虚拟阻抗技术的研究进展及新型电力系统发展趋势,探讨了虚拟阻抗在目前研究中存在的不足以及未来需要解决的关键问题。希望本文能够推动学术界和工业界的进一步交流,共同提升虚拟阻抗理论研究深度,探索虚拟阻抗更广阔的工程应用空间。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69. SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69(in Chinese).
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818. ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [3] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258. LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 赵炳洋, 赵波, 张芳, 等. 构网型逆变器技术综述[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(4): 57-67. ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, ZHANG Fang, et al. Overview of grid forming inverter technology[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2022, 37(4): 57-67(in Chinese).
- [6] 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): 592-606. CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 592-606(in Chinese).
- [7] 许诒翊, 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(in Chinese).
- [8] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 36-43. QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation

- discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 36-43(in Chinese).
- [9] LI Yan, SHUAI Zhikang, XU Qiming, et al. Droop control with an adjustable complex virtual impedance loop based on cloud model theory[C]//42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016: 3223-3228.
- [10] MICALEFF A, APAP M, SPITERI-STAINES C, et al. Performance comparison for virtual impedance techniques used in droop controlled islanded microgrids[C]//2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Capri, Italy: IEEE, 2016: 695-700.
- [11] SAVAGHEBI M, SHAFIEE Q, VASQUEZ J C, et al. Adaptive virtual impedance scheme for selective compensation of voltage unbalance and harmonics in microgrids[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [12] LI Chendan, CHAUDHARY S K, SAVAGHEBI M, et al. Power flow analysis for low-voltage AC and DC microgrids considering droop control and virtual impedance[C]//2017 IEEE Manchester PowerTech. Manchester, United Kingdom: IEEE, 2017: 1.
- [13] ZHANG Yue, DING Li, HOU Nie, et al. A direct actual-power control scheme for current-fed dual-active-bridge DC/DC converter based on virtual impedance estimation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(8): 8963-8975.
- [14] HE Jinwei, LI Yunwei. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(6): 2525-2538.
- [15] WANG Xiongfei, LI Yunwei, BLAABJERG F, et al. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(12): 7019-7037.
- [16] HE Jinwei, LI Yunwei. Analysis and design of interfacing inverter output virtual impedance in a low voltage microgrid[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2010: 2857-2864.
- [17] ZHANG Yuru, LI Yunwei. Energy management strategy for supercapacitor in droop-controlled DC microgrid using virtual impedance[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(4): 2704-2716.
- [18] GUO Li, ZHANG Shaohui, LI Xialin, et al. Stability analysis and damping enhancement based on frequency-dependent virtual impedance for DC microgrids[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(1): 338-350.
- [19] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(15): 2327-2335. YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(15): 2327-2335(in Chinese).
- [20] 张力, 任小永, 阮新波. 基于虚拟阻抗且提高系统带宽的抑制两级式逆变器中二次谐波电流的控制策略[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(6): 136-144. ZHANG Li, REN Xiaoyong, RUAN Xinbo. Control strategy to improve the bandwidth and reduce the second harmonic current in the two-stage inverter based on virtual impedance[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(6): 136-144(in Chinese).
- [21] ZHANG Xin, RUAN Xinbo, ZHONG Qingchang. Improving the stability of cascaded DC/DC converter systems via shaping the input impedance of the load converter with a parallel or series virtual impedance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7499-7512.
- [22] ZHANG Xin, ZHONG Qingchang, MING Wenlong. Stabilization of a cascaded DC converter system via adding a virtual adaptive parallel impedance to the input of the load converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(3): 1826-1832.
- [23] HUANG Xinze, RUAN Xinbo, FANG Jie, et al. A virtual impedance based control scheme for modular electrolytic capacitor-less second harmonic current compensator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1): 198-209.
- [24] 刘航, 王跃, 刘永慧, 等. 基于定量设计虚拟阻抗的VSG低电压穿越策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 245-256. LIU Hang, WANG Yue, LIU Yonghui, et al. The LVRT strategy for vsg based on the quantitatively designed virtual impedance[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 245-256(in Chinese).
- [25] LIU Yonghui, WANG Yue, LIU Hang, et al. An LVRT strategy with quantitative design of virtual impedance for VSG[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 140: 107661.
- [26] LI Mingxuan, WANG Yue, HU Weihao, et al. Unified modeling and analysis of dynamic power coupling for grid-forming converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(2): 2321-2337.
- [27] LI Mingxuan, SHU Sirui, WANG Yue, et al. Analysis and improvement of large-disturbance stability for grid-connected VSG based on output impedance optimization[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(8): 9807-9826.
- [28] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(18): 18-29. CHEN Yandong, LUO An, LONG Jigen, et al. Circulating current analysis and robust droop multiple loop control method for parallel inverters using resistive output impedance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(18): 18-29(in Chinese).
- [29] 王逸超, 罗安, 金国彬. 微网逆变器的不平衡电压补偿策略[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4956-4964. WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin. An unbalanced voltage compensation method for parallel inverters in microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 4956-4964(in Chinese).
- [30] 陈燕东, 罗安, 陈智勇, 等. 一种快速无功支撑的阻容性逆变器并联控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(30): 5296-5305. CHEN Yandong, LUO An, CHEN Zhiyong, et al. A rapid reactive power control method for parallel inverters using resistive-capacitive output impedance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(30): 5296-5305(in Chinese).
- [31] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(12): 1844-1852. ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A control strategy of 'virtual negative' impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(12): 1844-1852(in Chinese).
- [32] 屈子森, 蔡云旖, 杨欢, 等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(17): 58-66. QU Zisen, CAI Yunyi, YANG Huan, et al. Strategy of power decoupling control for virtual synchronous generator based on adaptive virtual impedances[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(17): 58-66(in Chinese).
- [33] 吴振奎, 耿云涛, 张继红, 等. 基于“虚拟负阻抗”的微网逆变器并联运行研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(10): 21-26. WU Zhenkui, GENG Yuntao, ZHANG Jihong, et al. Research on virtual negative impedance control of micro-grid inverters in parallel operation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(10): 21-26(in Chinese).
- [34] 陈杰, 刘名凹, 陈新, 等. 基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(7): 1450-1460. CHEN Jie, LIU Mingwa, CHEN Xin, et al. Wireless parallel and circulation current reduction of droop-controlled inverters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(7):

- 1450-1460(in Chinese).
- [35] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149(in Chinese).
- [36] 朱一听, 卓放, 王丰, 等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4552-4563.
ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Virtual impedance optimization method for microgrid reactive power sharing control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4552-4563(in Chinese).
- [37] 刘尧, 林超, 陈滔, 等. 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率—电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 16-21, 133.
LIU Yao, LIN Chao, CHEN Tao, et al. Reactive power-voltage control strategy of AC microgrid based on adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 16-21, 133(in Chinese).
- [38] 袁敞, 丛诗学, 徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 144-154.
YUAN Chang, CONG Shixue, XU Yanhui. Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 144-154(in Chinese).
- [39] 程军照, 李澍森, 吴在军, 等. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 27-32.
CHENG Junzhao, LI Shusen, WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 27-32(in Chinese).
- [40] ENGLER A, SOULTANIS N. Droop control in LV-grids[C]//2005 International Conference on Future Power Systems. Amsterdam, The Netherlands: IEEE, 2005: 6.
- [41] GUERRERO JM, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [42] RODRÍGUEZ-CABERO C, ROLDÁN-PÉREZ J, PRODANOVIC M. Virtual Impedance design considerations for virtual synchronous machines in weak grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1477-1489.
- [43] WEN Tiliang, ZHU Donghai, ZOU Xudong, et al. Power coupling mechanism analysis and improved decoupling control for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3028-3041.
- [44] HOU Guolian, XING Fulin, YANG Yu, et al. Virtual negative impedance droop method for parallel inverters in microgrids[C]//2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Auckland: IEEE, 2015: 1009-1013.
- [45] 张也, 颜湘武. 微网功率耦合特性分析及解耦控制[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 812-818.
ZHANG Ye, YAN Xiangwu. Coupling analysis and decoupling control of microgrid power[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 812-818(in Chinese).
- [46] 颜湘武, 崔森, 贾焦心. 虚拟稳态同步负阻抗的VSG功率解耦策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 102-113.
YAN Xiangwu, CUI Sen, JIA Jiaoxin. Virtual steady state synchronous negative impedance of a VSG power decoupling strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 102-113(in Chinese).
- [47] 李旭枫, 陆立民, 成乐祥, 等. 基于自适应虚拟阻抗改进无功环路的虚拟同步功率解耦控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3752-3760.
LI Xufeng, LU Limin, CHENG Lexiang, et al. Power decoupling control strategy in virtual synchronous generator with improved reactive power loop based on adaptive virtual impedance[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3752-3760(in Chinese).
- [48] 朱永兴. 虚拟负阻抗在微网下垂控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 66-71.
ZHU Yongxing. Application of virtual negative resistance on microgrid droop control[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(3): 66-71(in Chinese).
- [49] 张林, 张海波, 蒋维勇, 等. 基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步功率解耦策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-13 [2024-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230601.1743.008.html>.
- ZHANG Lin, ZHANG Haibo, JIANG Weiyong, et al. Power decoupling strategy for virtual synchronous generator based on adaptive dynamic virtual synchronous impedance[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13[2024-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230601.1743.008.html>(in Chinese).
- [50] 王俊凯, 牟龙华, 刘鑫. 基于动态虚拟阻抗的多并联逆变器间环流抑制控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 94-100.
WANG Junkai, MOU Longhua, LIU Xin. Control strategy based on dynamic virtual impedance to suppress circulating current between multiple parallel inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 94-100(in Chinese).
- [51] 吕志鹏, 盛万兴, 蒋雯倩, 等. 具备电压稳定和环流抑制能力的分频下垂控制器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 1-9.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, JIANG Wenqian, et al. Frequency dividing droop controllers with the function of voltage stabilization and circulation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 1-9(in Chinese).
- [52] 张宸宇, 郑建勇, 周福举, 等. 微网中一种具有环流抑制能力的改进下垂控制器[J]. 智能电网, 2014, 2(7): 37-41.
ZHANG Chenyu, ZHENG Jianyong, ZHOU Fujun, et al. An improved droop controller with circulating current restraining capability in micro-grid[J]. Smart Grid, 2014, 2(7): 37-41(in Chinese).
- [53] 孙艺鹤. 电网对称故障下构网型并网逆变器低电压穿越控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [54] HOOSHYAR H, BARAN M E. Fault analysis on distribution feeders with high penetration of PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2890-2896.
- [55] 李泽文, 肖仁平, 杜昱东, 等. 集中式光伏并网输电线路的故障暂态分析与保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 120-128.
LI Zewen, XIAO Renping, DU Yudong, et al. Fault transient analysis and protection for transmission lines with integration of centralized photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 120-128(in Chinese).
- [56] LI Tao, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Research on AC microgrid with current-limiting ability using power-state equation and improved Lyapunov-function method[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7306-7319.
- [57] FAN Bo, LIU Teng, ZHAO Fangzhou, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.
- [58] PAOLONE M, GAUNT T, GUILLAUD X, et al. Fundamentals of power systems modelling in the presence of converter-interfaced generation[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106811.
- [59] NATARAJAN V, WEISS G. Synchronverters with better stability due to virtual inductors, virtual capacitors, and anti-windup[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5994-6004.
- [60] BOTTRELL N, GREEN T C. Comparison of current-limiting

- strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3786-3797.
- [61] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [62] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1519-1531.
- [63] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140. CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140(in Chinese).
- [64] 张思东, 黄云辉, 周党生, 等. 弱电网下 VSC 控制环路对直流电压稳定性的影响分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2730-2741. ZHANG Sidong, HUANG Yunhui, ZHOU Dangsheng, et al. Impacts analysis of VSC control loop on DC voltage control stability in weak-grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2730-2741(in Chinese).
- [65] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.
- [66] ZHU Donghai, ZHOU Shiyang, ZOU Xudong, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4715-4727.
- [67] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Current limitation strategy for grid-forming converters under symmetrical and asymmetrical grid faults[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit: IEEE, 2020: 3746-3753.
- [68] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-411. SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-411(in Chinese).
- [69] LI Zilin, CHAN K W, HU Jiefeng, et al. An adaptive fault ride-through scheme for grid-forming inverters under asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12912-12923.
- [70] 梁建钢. 微电网变流器并网运行及并网和孤岛切换技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [71] MICALLEF A, APAP M, SPITERI-STAINES C. Selective virtual capacitive impedance loop for harmonic voltage compensation in islanded MicroGrids[C]//39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 7968-7973.
- [72] MICALLEF A, APAP M, SPITERI-STAINES C, et al. Cooperative control with virtual selective harmonic capacitance for harmonic voltage compensation in islanded microgrids[C]//38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 5619-5624.
- [73] HU Xiao, TANG Xisheng, LI Ningning, et al. Virtual impedance based parallel operation of multi-converters in low voltage microgrids [C]//2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2013: 1031-1036.
- [74] HE Jinwei, LI Yunwei, GUERRERO J M, et al. An islanding microgrid reactive power sharing scheme enhanced by programmed virtual impedances[C]//2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Aalborg: IEEE, 2012: 229-235.
- [75] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, CHEN Zhe. Autonomous control of inverter-interfaced distributed generation units for harmonic current filtering and resonance damping in an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 452-461.
- [76] HE Jinwei, LI Yunwei, GUERRERO J M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5272-5282.
- [77] 张颖. 基于虚拟阻抗的微网谐波抑制方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [78] 庞浩. 基于虚拟阻抗的并网逆变器谐波抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [79] BHATTACHARYA S, CHENG Potai, DIVAN D M. Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(3): 732-747.
- [80] HE Jinwei, MUNIR M S, LI Yunwei. Opportunities for power quality improvement through DG-grid interfacing converters[C]//2010 International Power Electronics Conference. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 1657-1664.
- [81] 陈杰, 章新颖, 闫震宇, 等. 基于虚拟阻抗的逆变器死区补偿及谐波电流抑制分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1671-1680. CHEN Jie, ZHANG Xinying, YAN Zhenyu, et al. Dead-time effect and background grid-voltage harmonic suppression methods for inverters with virtual impedance control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1671-1680(in Chinese).
- [82] 李飞. 分布式发电并网逆变器的虚拟谐波阻抗控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [83] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, CHEN Zhe. Synthesis of variable harmonic impedance in inverter-interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1407-1417.
- [84] 曾正, 赵荣祥, 吕志鹏, 等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4547-4558. ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, LÜ Zhipeng, et al. Impedance reshaping of grid-tied inverters to damp the series and parallel harmonic resonances of photovoltaic systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4547-4558(in Chinese).
- [85] 何元铭. 光伏逆变器集群谐振机理及抑制方法研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021.
- [86] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142. BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142(in Chinese).
- [87] 许爱国, 谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 49-53. XU Aiguo, XIE Shaojun. Study on digital control technique for inverters with instantaneous capacitor-current feedback[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 49-53(in Chinese).
- [88] 许德志, 汪飞, 阮毅. LCL、LLCL 和 LLCL 滤波器无源阻尼分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4725-4735. XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi. Passive damping of LCL, LLCL and LLCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4725-4735(in Chinese).
- [89] 陈新, 韦微, 胡雪峰, 等. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的研究及

- 新型有源阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 71-79.
CHEN Xin, WEI Zheng, HU Xuefeng, et al. Research on LCL filter in three-phase grid-connected inverter and novel active damping control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 71-79(in Chinese).
- [90] 曾正, 徐盛友, 冉立, 等. 应用于交流微电网谐振抑制的有源阻尼器及控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 15-20.
ZENG Zheng, XU Shengyou, RAN Li, et al. Active damper and its control for harmonic resonance damping of AC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 15-20(in Chinese).
- [91] JIA Lei, RUAN Xinbo, ZHAO Wenxin, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9561-9574.
- [92] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [93] 黎立丰, 郑天文, 郭岩, 等. 基于虚拟阻抗相角补偿的并联逆变器谐振抑制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4069-4075.
LI Lifeng, ZHENG Tianwen, GUO Yan, et al. Resonance analysis and suppression strategy for multi-parallel inverters based on phase angle compensation of virtual impedance[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4069-4075(in Chinese).
- [94] 宁思远. 带 LCL 滤波器的光伏并网逆变器复合控制策略[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [95] 卢秀和, 黄进. 基于虚拟电阻法的 LCL 滤波器特性分析[C]//中国电工技术学会学术年会——新能源发电技术论坛论文集. 威海: 中国电工技术学会, 2013: 293-297.
- [96] 伍小杰, 孙蔚, 戴鹏, 等. 一种虚拟电阻并联电容有源阻尼法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 122-128.
WU Xiaojie, SUN Wei, DAI Peng, et al. An active damping method of virtual resistor in parallel with capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 122-128(in Chinese).
- [97] CHEN H C, KO H C, CHENG Potai. An inrush current mitigation method for the grid-connected converters in the low-voltage ride-through operation[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA: IEEE, 2013: 1717-1724.
- [98] HAGWARA M, PHAM P V, AKAGI H. Calculation of DC magnetic flux deviation in the converter-transformer of a self-commutated BTB system during single-line-to-ground faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 698-706.
- [99] PEDRA J, SAINZ L, CORCOLES F, et al. Symmetrical and unsymmetrical voltage sag effects on three-phase transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1683-1691.
- [100] 梁量. 分布式 VSC 动态虚拟阻抗优化并联策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [101] 张巧杰, 余巧, 王久和, 等. 基于分段式虚拟阻抗的改进下垂控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 87-93.
ZHANG Qiaojie, YU Qiao, WANG Jiuhe, et al. Improved droop control based on piecewise virtual impedance[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 87-93(in Chinese).
- [102] 吕思卓, 郑超, 姜静雅. 基于功率指令切换的双级式构网型光伏故障穿越控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1281-1290.
LÜ Sizhuo, ZHENG Chao, JIANG Jingya. Fault ride-through control strategy for double-stage grid-forming photovoltaic based on power order switching[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1281-1290(in Chinese).
- [103] 赵永熹, 高鹏超, 范宏. 基于虚拟阻抗-模糊算法的交直流微电网混合储能功率协调策略[J/OL]. 上海交通大学学报, 2023: 1-23 [2024-01-04]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.308>.
ZHAO Yongxi, GAO Pengchao, FAN Hong. Power coordination strategy for hybrid energy storage in AC/DC microgrids based on virtual Impedance-fuzzy algorithm[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023: 1-23[2024-01-04]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.308>(in Chinese).
- [104] 张泽正, 文传博. 虚拟复阻抗下的低压并联逆变器改进下垂控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 70-77.
ZHANG Zezheng, WEN Chuanbo. Improved droop control strategy for low voltage parallel inverter under virtual complex impedance[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 70-77(in Chinese).
- [105] SINGHAL A, VU TL, DU Wei. Consensus control for coordinating grid-forming and grid-following inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4123-4133.
- [106] 邱晓燕, 闫幸, 周毅, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型与跟网型逆变器主导微电网系统无功功率均分控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 22-32.
QIU Xiaoyan, YAN Xing, ZHOU Yi, et al. Reactive power sharing control strategy for microgrids dominated by grid-forming and grid-following inverters based on adaptive virtual impedance[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 22-32(in Chinese).
- [107] 赵巧娥, 张乐乐, 武晓冬, 等. 基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 30-39.
ZHAO Qiao'e, ZHANG Lele, WU Xiaodong, et al. Control strategy for multi-inverters based on parallel virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 30-39(in Chinese).
- [108] PAQUETIE A D, DIVAN D M. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1630-1638.
- [109] 周京华, 李津. 微电网三电平储能变流器优化控制技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3137-3148.
ZHOU Jinghua, LI Jin. Review of optimal control technology for three-level power converter system in microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3137-3148(in Chinese).
- [110] CHEN Zhi, PEI Xuejun, ZHU Wenjing, et al. A two-stage combined control strategy for parallel operation of inverter[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, Canada: IEEE, 2015: 4582-4587.



范宸琿

在线出版日期: 2024-03-21.

收稿日期: 2024-01-10.

作者简介:

范宸琿(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化控制、先进输电技术等, E-mail: fanchenhui@ncepu.edu.cn;

秦晓辉(1979), 男, 通信作者, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与规划技术、电力系统新技术应用等, E-mail: qinxh@epri.sgcc.com.cn;

齐磊(1978), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进输电技术、电力系统电磁兼容等, E-mail: qilei@ncepu.edu.cn;

丁保迪(1991), 男, 工程师, 研究方向为微电网运行控制、构网型变流器优化配置技术等, E-mail: dingbaodi@epri.sgcc.com.cn;

刘宏志(1978), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源并网技术等, E-mail: liuhz@hotmial.com;

孟政吉(1994), 男, 工程师, 研究方向为微电网优化控制、新能源与储能技术等, E-mail: mzhengji@126.com.

(责任编辑 马晓华)

附录 A

当将功率观测点选取在变流器交流滤波电容出口处时,其输出的等效电路图如附录图 A1 所示,主体结构与正文中的图 3 相同。(图 A1 中各变量,除了变量 S 的含义变为了从变流器交流滤波电容出口向右侧注入的复功率以外,其余各变量的含义均与正文相同。)

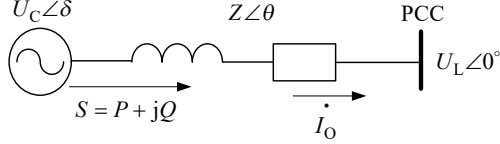


图 A1 功率观测点在变流器交流滤波电容出口时的等效输出电路

Fig. A1 Equivalent output circuit diagram of power observation point at the outlet of AC filtering capacitor in converter

其从变流器交流滤波电容出口向右侧注入的复功率 S 为

$$S = P + jQ = \dot{U}_C \dot{I}_O^* \quad (\text{A1})$$

将正文中的式(1)代入式(A1), 可得:

$$\begin{cases} P = \frac{U_C [R(U_C - U_L \cos \delta) + U_L X \sin \delta]}{R^2 + X^2} \\ Q = \frac{U_C [X(U_C - U_L \cos \delta) - U_L R \sin \delta]}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

当传输阻抗近似呈现纯感性时, 即 $X \gg R$, $R \approx 0$, 则式(A2)可化简为:

$$\begin{cases} P = \frac{U_C U_L \sin \delta}{X} \\ Q = \frac{U_C (U_C - U_L \cos \delta)}{X} \end{cases} \quad (\text{A3})$$

一般情况下变流器输出电压 \dot{U}_C 与 PCC 点处电压 \dot{U}_L 之间的相位差 δ 很小, 可近似认为 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$, 对式(A3)进一步化简得:

$$\begin{cases} P = \frac{U_C U_L \delta}{X} \\ Q = \frac{U_C (U_C - U_L)}{X} \end{cases} \quad (\text{A4})$$

分别对有功功率和无功功率求微分, 并考虑到 δ 很小, 认为 $\delta \approx 0$, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{U_C U_L}{X} \\ \frac{\partial P}{\partial U_C} = \frac{U_L \delta}{X} \approx 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial U_C} = \frac{2U_C - U_L}{X} \end{cases} \quad (\text{A5})$$

由此可知, 当电网环境呈现纯感性时, 变流器输出的有功功率 P 主要取决于变流器输出电压与网侧电压之间的功角差 δ ; 无功功率 Q 主要取决于变流器输出电压幅值 U_C , 此时的有功、无功功率之间几乎不存在耦合。该分析结论与正文中将功率观测点选取在 PCC 点时相同。

附录 B

当传输阻抗近似呈现纯阻性时, 即 $R \gg X$, $X \approx 0$, 则正文中的式(3)可化简为:

$$\begin{cases} P = \frac{U_L (U_C \cos \delta - U_L)}{R} \\ Q = -\frac{U_L U_C \sin \delta}{R} \end{cases} \quad (\text{B1})$$

$$\begin{cases} P = \frac{U_L (U_C - U_L)}{R} \\ Q = -\frac{U_L U_C \delta}{R} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \delta} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial U_C} = \frac{U_L}{R} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} = -\frac{U_L U_C}{R} \\ \frac{\partial Q}{\partial U_C} = -\frac{U_L \delta}{R} \approx 0 \end{cases} \quad (\text{B3})$$

由式(B1)~(B3)可知, 在纯阻性电网环境下, 有功功率 P 主要取决于变流器输出电压幅值 U_C ; 无功功率 Q 主要取决于变流器输出电压与网侧电压之间的功角差 δ , 此时的有功、无功功率之间几乎不存在耦合。