

DOI: 10.7667/PSPC160624

应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述

袁 敞, 丛诗学, 徐衍会

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 微电网是由分布式电源、储能装置和负荷等组成的统一整体, 随着分布式电源渗透率的不断提高, 微电网的应用越发广泛。在实际运行中, 微电网中通常会出现并网逆变器功率分配不均、谐波污染、串并联谐振、故障电流和励磁涌流过大等问题。虚拟阻抗技术能够改变并网逆变器的阻抗特性, 对于上述问题的解决效果颇佳, 而且实现简单, 因此具有广泛的应用前景。全面综述了虚拟阻抗的应用场景和相应的实现方法, 并结合自适应虚拟阻抗这一现阶段的研究热点, 探讨了未来的研究趋势和可能遇到的关键问题。

关键词: 虚拟阻抗; 下垂控制优化; 谐波补偿; 谐振抑制; 故障电流限制; 励磁涌流抑制

Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid

YUAN Chang, CONG Shixue, XU Yanhui

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: Microgrid is a unity composed of distributed generation, energy storing devices and load. As the penetration of distributed generation increasing, microgrid application domain is more extensive. Some problems often occur in microgrid, such as parallel inverter power distribution imbalance, harmonic pollution, series parallel resonance, fault current and inrush current. Virtual impedance technology which is achieved easily can change the impedance characteristics of grid-connected inverters and solve the above problems effectively, hence this technology has broad application prospects. This paper comprehensively introduces the application scenarios of virtual impedance and corresponding implementation methods, combined with adaptive virtual impedance that is the current hot research topics, and discusses the future research trends and key issues that may be encountered.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677066).

Key words: virtual impedance; droop control optimizing; harmonic suppression; resonance damping; fault current limiting; inrush current suppression

0 引言

微电网是由分布式电源、储能装置和负荷等组成的统一整体^[1-4], 既可以实现并网与孤岛两种模式的无缝切换, 又能够减轻新能源接入给系统带来的不利影响^[5], 提高供电可靠性和电能质量, 近年来受到了广泛的关注。国际电工委员会(IEC)在《2010—2030 应对能源挑战白皮书》中明确将微电网技术列为未来能源链的关键技术之一^[6]。

微电网由于其固有特点, 在运行时会出现一系列问题。1) 微电网中的各个并网逆变器通过下垂控

制并联运行, 传统下垂控制的应用前提是各个逆变器到公共耦合点的线路阻抗呈感性。但微电网的电压等级一般在 10 kV 以下, 线路阻抗以阻性为主, 这将导致逆变器的输出功率出现耦合效应。此外, 各逆变器到公共耦合点的线路阻抗与其地理位置等因素有关, 具有一定的随机性, 这将导致各逆变器的出口电压不完全一致, 进而影响逆变器的无功均分。2) 整流、逆变装置等电力电子元件的大量应用和非线性负荷的大量接入会在微电网内产生严重的谐波污染。3) 微电网复杂的网络阻抗极易激发各种串并联谐振, 严重时甚至会引起并网逆变器的无故障跳闸。2004 年, 荷兰 Dutch Nieuwland 微电网曾出现过因谐振引起的并网逆变器跳闸事故^[7]。4) 微电网

中的逆变器等电力电子器件承受过电流的能力有限, 当微网线路发生故障时, 过大的故障电流会烧毁设备, 进而引起停电等事故。5) 电网电压暂降引起的变压器励磁涌流会对变压器的运行造成不利影响。微电网结构和上述问题如图 1 所示。

以电压电流与阻抗的物理关系为基础的虚拟阻抗技术能够在无额外损耗的前提下重塑逆变器输出阻抗特性, 对于上述问题的解决效果颇佳, 因此成为当前电力电子领域的一个研究热点。现阶段对虚拟阻抗技术进行持续研究的学术团队主要包括加拿大阿尔伯塔大学的李云伟教授、丹麦奥尔堡大学的 Guerrero, J. M 教授、英国利物浦大学的钟庆昌教授以及南京航空航天大学的阮新波教授等团队。

李云伟教授团队对虚拟阻抗技术的研究较为全面, 从功率控制、谐波不平衡抑制、谐振抑制到次同步稳定、故障穿越等均有涉及^[8-13]; Guerrero, J.M 教授团队的研究侧重于微电网层级控制性能优化中虚拟阻抗所承担的作用^[14-19]; 钟庆昌教授团队的研究方向是通过虚拟阻抗改善级联 DC/DC 系统的稳定性^[20-21]; 阮新波教授团队的研究则是从输出阻抗的角度分析虚拟阻抗对系统性能的优化, 在此基础上实现谐波抑制, 增强系统鲁棒性^[22-24]。

本文分别从下垂控制优化, 谐波抑制, 谐振抑制, 故障电流限制和励磁涌流抑制五个方面对虚拟阻抗技术进行全面的介绍, 并结合当前的研究热点, 探讨了未来的研究趋势和可能遇到的关键问题。

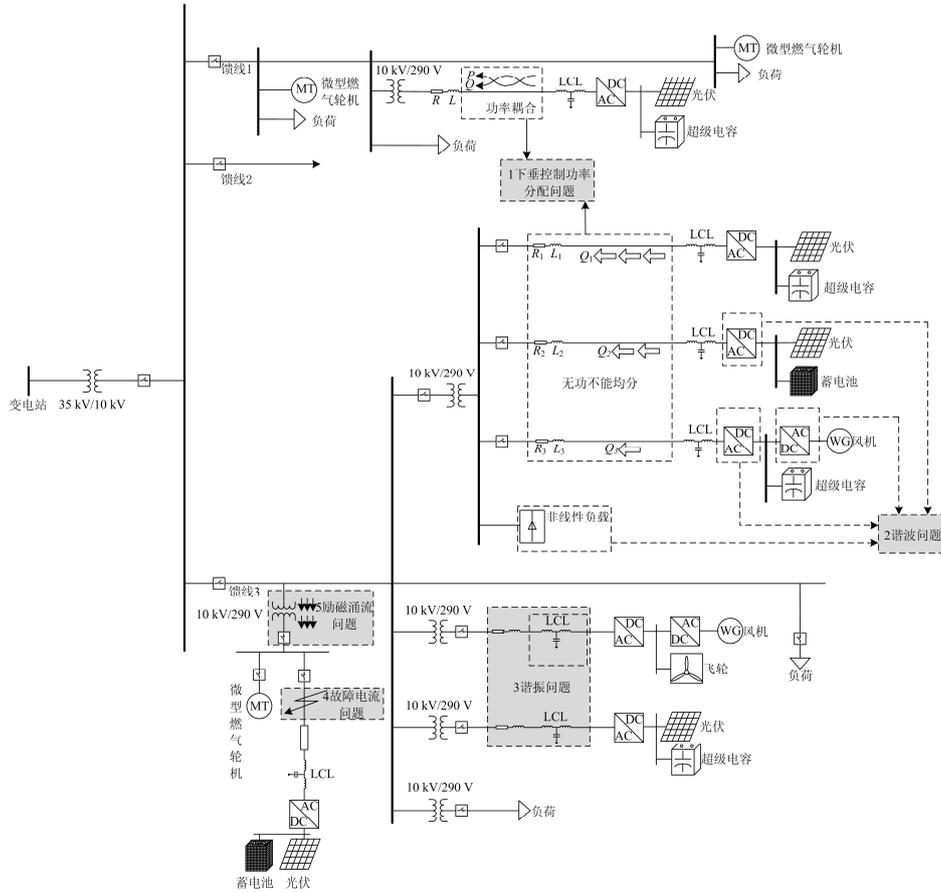


图 1 微电网结构和典型问题示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microgrid structure and typical problems

1 下垂控制优化

图 2 为单台 DG 并网结构和控制示意图。如图所示, DG 经 LC 滤波器、输电线路和升压变压器与大电网相连。下垂控制模块通过指令功率 P_{ref} 、 Q_{ref} 和线路实际功率 P_o 、 Q_o 计算出 LC 滤波器出口的指

令电压 $u_{o,abc}^*$, 电压外环控制 LC 滤波器出口电压 $u_{o,abc}$ 跟踪该指令电压并得到滤波电感指令电流 $i_{L,abc}^*$, 电流内环控制滤波电感电流 $i_{L,abc}$ 跟踪该指令电流并得到三相调制信号, 继而触发 PWM 调制器, 生成脉冲信号, 最终使 DG 工作在电压源模式。

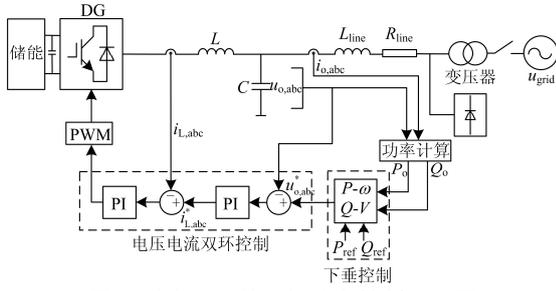


图 2 单台 DG 并网结构和控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single DG grid-connected structure and control

下垂控制技术不但可应用于单台逆变器的控制，也可用于逆变器之间的并联控制。下垂控制由于避免了各个逆变器之间的信息传递而在微网中得到了广泛应用^[25-26]。下垂控制的数学表达式为

$$\begin{cases} f_i = f_i^* - k_{pi}(P_i - P_i^*) \\ E_i = E_i^* - k_{qi}(Q_i - Q_i^*) \end{cases} \quad (1)$$

式中： f_i, E_i 是第 i 个 DG 调节的目标频率和目标电压； f_i^*, E_i^* 是第 i 个 DG 的额定频率和额定电压； k_{pi}, k_{qi} 是第 i 个 DG 的有功下垂系数和无功下垂系数； P_i^*, Q_i^* 是第 i 个 DG 的额定有功功率和额定无功功率； P_i, Q_i 是第 i 个 DG 输出的实际有功功率和实际无功功率。

下垂控制的应用前提是线路阻抗表现为纯感性，如图 3 所示。

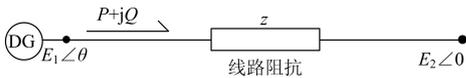


图 3 功率传输示意图

Fig. 3 Schematic diagram of power transmission

其中 $z=jx$ ，一般情况下，线路两侧功角差很小，即 $\theta \approx 0, \cos \theta \approx 1$ ，此时有功、无功的表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{E_1 E_2 \sin \theta}{x} \\ Q = \frac{E_1 (E_1 - E_2)}{x} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知，调节电压相角可实现有功的控制，调节电压差值可实现无功的控制，这就是传统下垂控制的基本原理。但微网电压等级一般较低，而且线路阻抗一般并不表现为纯感性，即 $z=r+jx$ 。

此时有功、无功的数学表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{E_1 [r(E_1 - E_2 \cos \theta) + E_2 x \sin \theta]}{r^2 + x^2} \\ Q = \frac{E_1 [x(E_1 - E_2 \cos \theta) - E_2 r \sin \theta]}{r^2 + x^2} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知，DG 输出的有功无功之间存在耦合效应。而且传统下垂控制中，一般设置每台逆变器的额定频率、额定电压相同，同时满足等式 $k_{pi} P_i^* = k_{pj} P_j^*, k_{qi} Q_i^* = k_{qj} Q_j^*$ ^[27]，则系统稳定后，如果 $f_i=f_j, E_i=E_j$ ，功率即按照每台逆变器的额定容量均分。微网稳定后， $f_i=f_j$ ，但各个逆变器到 PCC 点的线路阻抗与其地理位置等因素有关，具有一定的随机性，一般情况下各个逆变器的出口电压并不完全相同，因此各个逆变器的无功功率无法按照各自的额定无功进行均分。综上所述，传统下垂控制在微网中的应用存在缺陷。

虚拟阻抗可以重塑逆变器的输出阻抗，改进下垂控制。引入虚拟阻抗的 DG 并网示意图如图 4 所示。

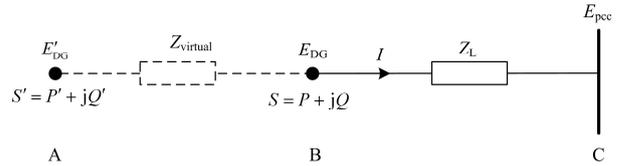


图 4 引入虚拟阻抗后的系统等效示意图

Fig. 4 Equivalent system schematic diagram after introducing virtual impedance

图中：C 点是逆变器的公共耦合点；B 点是逆变器的实际出口；A 点是逆变器的虚拟出口。线路阻抗 $Z_L=R+jX$ ，虚拟阻抗 $Z_{virtual}$ 。如果 $Z_{virtual} + Z_L$ 为纯感性，A 点的功率即可实现解耦。具体方法分为虚拟电感控制^[28]和虚拟负电阻控制^[29-30]，接下来对两种方法进行详细介绍。

当引入虚拟电感时，即 $Z_{virtual}=X_{virtual}$ ，如果 $X_{virtual} + X$ 远大于 R ，A 点的功率即可实现解耦。在 B 点：

$$\begin{cases} P = P' \\ Q = Q' - I^2 X_{virtual} = \frac{E' [(X_{virtual} + X)(E' - E_{pcc} \cos \theta') - E_{pcc} R \sin \theta']}{R^2 + (X_{virtual} + X)^2} - \frac{(E'^2 + E_{pcc}^2 - 2E'E_{pcc} \cos \theta') X_{virtual}}{R^2 + (X_{virtual} + X)^2} \\ \approx \frac{E'X(E' - E_{pcc} \cos \theta') + E_{pcc} X_{virtual}(E' \cos \theta' - E_{pcc})}{R^2 + (X_{virtual} + X)^2} - \frac{E'E_{pcc} R \sin \theta'}{R^2 + (X_{virtual} + X)^2} \approx \frac{(E'X + E_{pcc} X_{virtual})(E' - E_{pcc})}{R^2 + (X_{virtual} + X)^2} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知，B 点的无功仍可通过电压差值来控制。

当引入虚拟负电阻时, 即 $Z_{\text{virtual}} = -R_{\text{virtual}}$, 如果 $R_{\text{virtual}} = R$, 输出阻抗呈纯感性, A 点的功率即可实现解耦。在 B 点:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = Q' \\ P = P' - I^2(-R_{\text{virtual}}) = \\ \frac{E' \left[(-R_{\text{virtual}} + R)(E' - E_{\text{pcc}} \cos \theta') + E_{\text{pcc}} X \right]}{X^2 + (-R_{\text{virtual}} + R)^2} \\ \frac{(E'^2 + E_{\text{pcc}}^2 - 2E'E_{\text{pcc}} \cos \theta')(-R_{\text{virtual}})}{X^2 + (-R_{\text{virtual}} + R)^2} = \quad (5) \\ \frac{(E'^2 R + E_{\text{pcc}}^2 R_{\text{virtual}}) - E'E_{\text{pcc}}(R_{\text{virtual}} + R)}{X^2 + (-R_{\text{virtual}} + R)^2} \approx \\ \frac{E'E_{\text{pcc}} X \sin \theta'}{R^2 + (X_{\text{virtual}} + X)^2} \end{array} \right.$$

由式(5)可知, B 点的有功仍可通过电压相角来控制。

综上所述, 虚拟阻抗技术可以优化传统下垂控制, 实现有功无功的解耦, 同时成比例地调整虚拟阻抗, 使各台逆变器出口电压一致, 即可实现无功功率在各个逆变器间的均分^[31]。对于虚拟阻抗的取值, 文献[32]根据微电网不同运行模式下的小信号模型, 设计出了虚拟阻抗数值的理想范围, 对此本文不再赘述。

根据虚拟阻抗的原理, 首先由下垂控制得出参考电压 u_{ref} , 再由逆变器输出电流、角频率计算出虚拟阻抗上的压降 u_{virtual} , 将 $u_{\text{ref}} - u_{\text{virtual}}$ 作为 LC 滤波器出口电压参考值, 通过双环控制使 LC 滤波器出口电压跟踪该参考值, 即可实现在控制中加入虚拟阻抗。具体实现如图 5 所示。

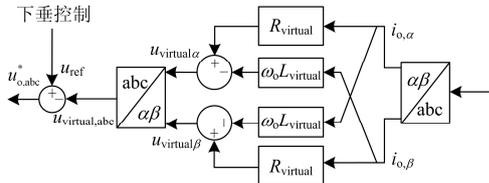


图 5 虚拟阻抗优化下垂控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of droop control optimization by virtual impedance

上述两种虚拟阻抗技术虽然均可以起到优化下垂控制的作用, 但两种方法在实际运行中却存在着一定的差异。虚拟电感技术会较大程度地增加系统等效输出阻抗, 加重母线电压降落, 影响电能质量。虚拟电阻技术虽然没有增大电压降落的缺点, 但该技术对虚拟负电阻阻值精确度要求较大, 其阻值不

易整定, 而当线路参数存在测量误差或漂移时, 容易引起并联系统的不稳定。

2 谐波抑制

如图 2 所示, 当 DG 接有二极管整流器等非线性负荷时, 非线性负荷产生的谐波电流会在线路阻抗上形成谐波电压, 对逆变器的运行造成不利影响。

虚拟阻抗可以重塑逆变器在各次谐波频率上的输出阻抗, 既可以有效解决由非线性负荷产生的谐波问题, 也可以有效抑制从大电网侧逐级传递过来的谐波^[33]。

虚拟阻抗抑制谐波最早出现在文献[34]中, 该文献在有源滤波系统中构造出一个数值可变的电感, 实现了对特定频次谐波的滤除。现阶段采用虚拟阻抗抑制谐波, 首先要从逆变器输出电流中分离出各次谐波电流, 随后对各次谐波电流分别进行补偿。分离谐波电流比较常见的方法是通过旋转变换得到各次谐波电流的 dq 分量(含干扰量), 再由低通滤波器(LPF)滤除其他干扰量, 最终得到各次谐波电流分量^[35-36], 其实现如图 6 所示。

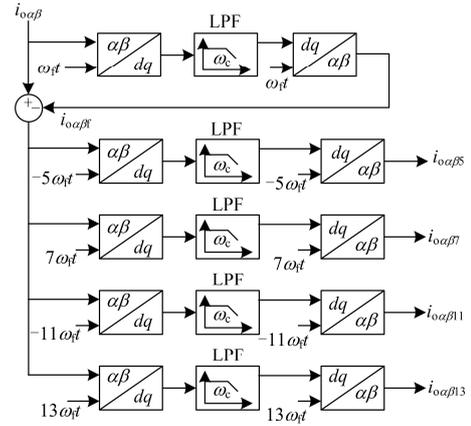


图 6 分离各次谐波电流示意图^[36]

Fig. 6 Schematic diagram of harmonic current separation

其中, $i_{o\alpha\beta}$ 是两相坐标系下的逆变器输出电流, ω_f 是基波频率, ω_c 是低通滤波器(LPF)的截止频率。经图 6 所示, 各次谐波电流即可从输出电流中提取出来, 而各次谐波阻抗可由相应的谐波电流经式(6)、式(7)得出。

正序虚拟阻抗为

$$\begin{pmatrix} u_{\text{virtual},a, hp} \\ u_{\text{virtual},\beta, hp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_{hp, \text{vir}} & -\omega_{hp} L_{hp, \text{vir}} \\ \omega_{hp} L_{hp, \text{vir}} & -R_{hp, \text{vir}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{o\alpha hp} \\ i_{o\beta hp} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: “ h ”表示谐波次数; “ p ”表示正序; $i_{o\alpha hp}$ 、 $i_{o\beta hp}$ 分别是逆变器输出电流正序各次谐波电流的 α 分量, β 分量; $R_{hp, \text{vir}}$ 、 $L_{hp, \text{vir}}$ 是正序各次谐波电流的

虚拟电阻和虚拟电感； ω_{hp} 是正序各次谐波角频率； $u_{\text{virtual},\alpha, hp}$ 、 $u_{\text{virtual},\beta, hp}$ 分别是正序虚拟阻抗压降的 α 分量、 β 分量。

负序虚拟阻抗为

$$\begin{pmatrix} u_{\text{virtual},\alpha, hn} \\ u_{\text{virtual},\beta, hn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_{hn, \text{vir}} & \omega_{hn} L_{hn, \text{vir}} \\ -\omega_{hn} L_{hn, \text{vir}} & -R_{hn, \text{vir}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha hn} \\ i_{\beta hn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中：“ h ”表示谐波次数；“ n ”表示负序； $i_{\alpha hn}$ 、 $i_{\beta hn}$ 分别是逆变器输出电流负序各次谐波电流的 α 分量、 β 分量； $R_{hn, \text{vir}}$ 、 $L_{hn, \text{vir}}$ 是负序各次谐波电流的虚拟电阻和虚拟电感； ω_{hn} 是负序各次谐波角频率； $u_{\text{virtual},\alpha, hn}$ 、 $u_{\text{virtual},\beta, hn}$ 分别是负序虚拟阻抗压降的 α 分量、 β 分量。虚拟正负序谐波阻抗实现如图 7 所示。

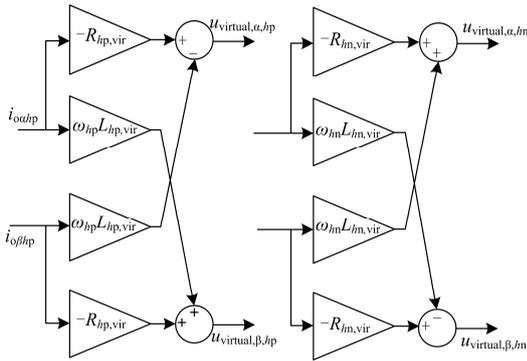


图 7 虚拟正负序谐波阻抗实现示意图^[36]

Fig. 7 Schematic diagram of virtual positive and negative sequence harmonic impedance

当虚拟谐波负电感和虚拟谐波负电阻的压降与各次谐波电流在线路阻抗上的谐波压降互相抵消时，即可实现谐波抑制功能。当采用虚拟阻抗技术进行多次谐波补偿时，由于每一次谐波都需要单独设置补偿虚拟阻抗，在实际应用中其硬件设备会较为复杂。其整体实现如图 8 所示。

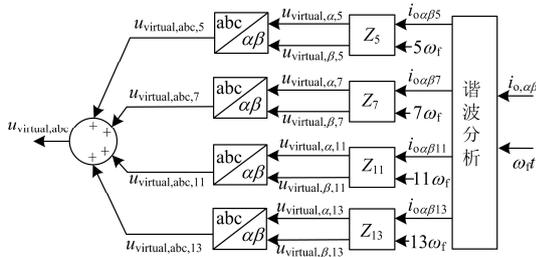


图 8 虚拟谐波阻抗抑制谐波示意图

Fig. 8 Virtual harmonic impedance diagram to suppress harmonic wave

3 谐振抑制

逆变器也可通过 LCL 滤波器与大电网相连，其

运行方式和图 2 类似。

LCL 滤波器会产生谐振现象，在谐振频率处出现谐振尖峰，如图 9 所示。

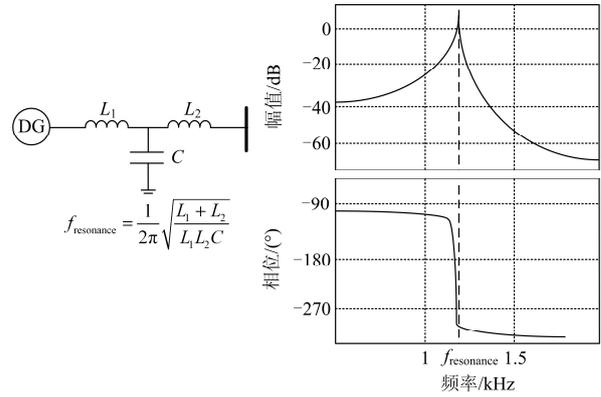


图 9 LCL 滤波器谐振示意图

Fig. 9 Schematic diagram of LCL filter resonance

谐振尖峰的出现会放大线路中的谐波，引起逆变器的无故障跳闸。同时，微电网复杂的网络阻抗会在并联的各 LCL 滤波器间产生交互作用，引发并联谐振，甚至会引发微网系统与大电网之间的串联谐振，使得谐振现象更为复杂。文献[37]分别研究了并联有不同台数逆变器的微网系统的三种谐振，并得出了三种谐振的伯德图。

虚拟阻抗抑制谐振的原理，是通过控制方法在 LCL 滤波器的逆变器侧滤波电感 L_1 支路串联虚拟电阻，或在滤波电容 C 支路并联虚拟电阻，增加阻尼，如图 10 所示。

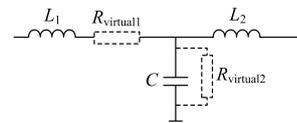


图 10 虚拟电阻抑制谐振示意图

Fig. 10 Virtual resistance diagram to inhibit resonance

其整体实现如图 11 所示。

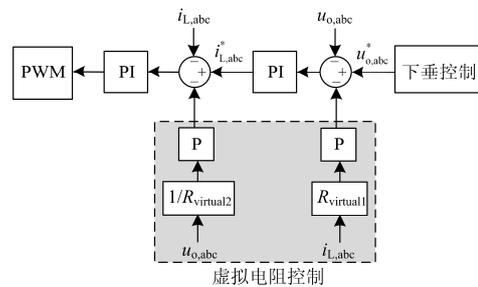


图 11 虚拟电阻抑制谐振控制示意图

Fig. 11 Virtual resistance control diagram to inhibit resonance

4 故障电流限制

如图 2 所示, 系统发生故障时会出现很大的故障电流, 电力电子器件承受过流的能力有限, 在微网发生故障的情形下, 必须限制电流的大小^[38]。

虚拟阻抗限制故障电流的原理是通过虚拟阻抗压降减小电压环参考电压值^[32, 39-40], 从而减小电流参考值, 最终减小输出电流, 其实现如图 5 所示。

但虚拟阻抗的稳态压降会影响电压调整的性能, 尤其当 DG 与同步发电机并联运行时, 稳态压降会引起较大的无功误差, 因此有必要消除虚拟阻抗的稳态压降。文献[26,41]通过调节每个 DG 的电压参考来补偿虚拟阻抗的稳态压降, 文献[42]则是用暂态虚拟阻抗代替的正常的虚拟阻抗, 接下来对其原理进行详细介绍。

在 dq 坐标系下, 正序基波稳态电流是恒定值, 会被高通滤波器滤除。因此, 暂态虚拟阻抗表达式为

$$\begin{cases} u_{\text{virtual}d} = R'_{\text{virtual}} i_{o,d} s / (s + \omega_c) - \omega L'_{\text{virtual}} i_{o,q} s / (s + \omega_c) \\ u_{\text{virtual}q} = R'_{\text{virtual}} i_{o,q} s / (s + \omega_c) - \omega L'_{\text{virtual}} i_{o,d} s / (s + \omega_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i_{o,d}$ 、 $i_{o,q}$ 分别是逆变器输出电流的 d 轴和 q 轴分量; ω_c 是高通滤波器的截止频率; R'_{virtual} 、 L'_{virtual} 是虚拟电感和虚拟电阻(恒定值); ω 是系统频率。由式(8)可知, 稳态时, 虚拟阻抗的压降会降至 0, 即消除了稳态压降。电流超过最大容许电流 I_{max} 时, 电流限制功能由附加虚拟阻抗来实现。为了确保电流限制功能, 该附加虚拟阻抗不能由高通滤波器实现, 其表达式为

$$\begin{cases} \Delta R_{\text{virtual}} = \max \left(k \left(\sqrt{i_{o,d}^2 + i_{o,q}^2} - I_{\text{max}} \right), 0 \right) \\ \Delta L_{\text{virtual}} = \Delta R_{\text{virtual}} (\Delta X/R) \end{cases} \quad (9)$$

式中: k 是电流限制虚拟阻抗比例增益; $\Delta X/R$ 是电流限制虚拟阻抗感阻比。该附加虚拟阻抗的实现如图 12 所示。

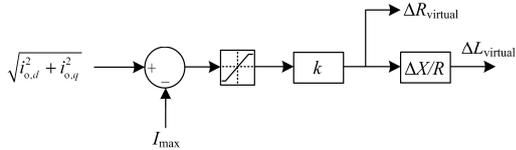


图 12 电流限制附加虚拟阻抗实现图^[42]

Fig. 12 Current limit additional virtual impedance diagram

因此, 总电流限制虚拟阻抗为

$$\begin{cases} R_{\text{virtual}} = R'_{\text{virtual}} + \Delta R_{\text{virtual}} \\ L_{\text{virtual}} = L'_{\text{virtual}} + \Delta L_{\text{virtual}} \end{cases} \quad (10)$$

总虚拟阻抗压降为

$$\begin{cases} u_{\text{virtual}d} = R'_{\text{virtual}} i_{o,d} s / (s + \omega_c) - \omega L'_{\text{virtual}} i_{o,q} s / (s + \omega_c) + \\ \Delta R_{\text{virtual}} i_{o,d} - \Delta \omega L_{\text{virtual}} i_{o,q} \\ u_{\text{virtual}q} = R'_{\text{virtual}} i_{o,q} s / (s + \omega_c) - \omega L'_{\text{virtual}} i_{o,d} s / (s + \omega_c) + \\ \Delta R_{\text{virtual}} i_{o,q} + \Delta \omega L_{\text{virtual}} i_{o,d} \end{cases} \quad (11)$$

总虚拟阻抗限制故障电流的实现如图 13 所示。

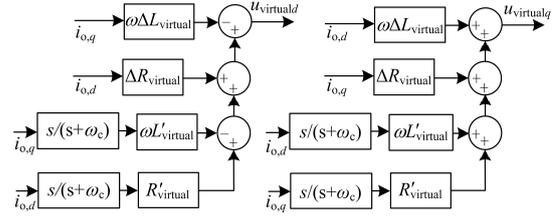


图 13 总电流限制虚拟阻抗控制实现图^[42]

Fig. 13 Total current limit virtual impedance control diagram

上述通过虚拟阻抗限制故障电流的法较为新颖, 暂态虚拟阻抗与附加虚拟阻抗的结合应用可消除稳态压降, 提高电能质量, 增强系统稳定性。但该方案中采用的虚拟阻抗与优化下垂控制、谐波抑制中采用的虚拟阻抗是否会有控制效果上的冲突, 该文献并没有深入探讨。

5 励磁涌流抑制

如图 2 所示, 并网逆变器一般通过升压变压器与大电网相连^[43-44]。三相升压变压器的电路如图 14 所示。

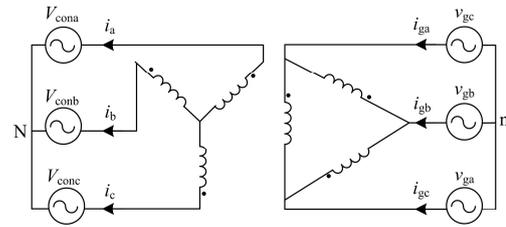


图 14 三相升压变压器电路图^[45]

Fig. 14 Three-phase step-up transformer circuit diagram

图中: v_{cona} , v_{conb} , v_{conc} 是逆变器侧电压; i_a , i_b , i_c 是逆变器侧电流; v_{ga} , v_{gb} , v_{gc} 是电网侧电压; i_{ga} , i_{gb} , i_{gc} 是电网侧电流。其 a 相等效电路如图 15 所示。

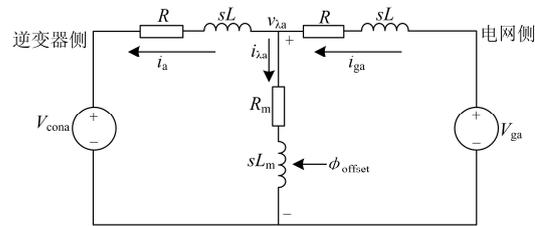


图 15 升压变压器 a 相等效电路^[45]

Fig. 15 a phase equivalent circuit of step-up transformer

图中： R 是绕组电阻； L 是绕组漏电感； R_m 是铁芯损耗电阻； L_m 是磁化电感。

电网电压突然降低时，引起的磁通偏量 ϕ_{offset} 会在变压器中存在较长时间。当电网电压恢复正常时，如果该磁通偏量仍然存在，则会在变压器中引起励磁涌流^[46-47]。针对该问题，文献[45]通过构造直流虚拟电阻，加速了变压器中磁通偏量的消耗，如图 16 所示。接下来对其原理进行详细介绍。

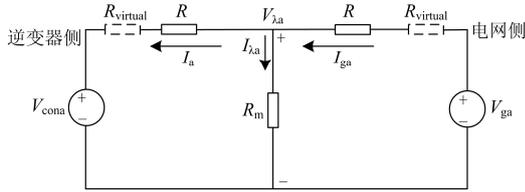


图 16 直流虚拟电阻控制示意图^[45]

Fig. 16 Schematic diagram of DC virtual resistance control

由图 16 所知，电路的物理关系为

$$I_{\lambda a} - \frac{V_{ga} - V_{\lambda a} - I_{ga} \cdot R_{\text{virtual}}}{R} + \frac{V_{\lambda a} - V_{\text{cona}} - I_a \cdot R_{\text{virtual}}}{R} = 0 \quad (12)$$

式(12)中的物理量均为直流量，通过直流量构造虚拟电阻，不但可以避免对变压器中各项交流量造成影响，同时也能起到消耗偏差磁通的作用。为了方便在并网逆变器侧通过控制方法加入虚拟电阻，上式变为

$$I_{\lambda a} - \frac{V_{ga} - V_{\lambda a}}{R} + \frac{V_{\lambda a} - V_{\text{cona}} - I_a \cdot R_{\text{virtual}} + I_{ga} \cdot R_{\text{virtual}}}{R} = 0 \quad (13)$$

其实现如图 17 所示。

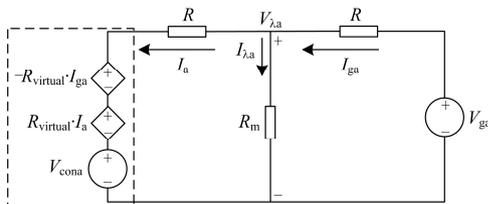


图 17 逆变器侧直流虚拟电阻控制示意图^[45]

Fig. 17 Virtual resistance control schematic diagram of inverter in DC side

整体实现如图 18 所示。低通滤波器(LFP)用来从交流量中提取直流量， V_a^* 是逆变器侧需要增加的直流电压值。

实验结果证明该方案可有效抑制励磁涌流，但该文献并未对虚拟电阻加速磁通消耗的机理做出详细分析，相关工作还有待进一步开展。

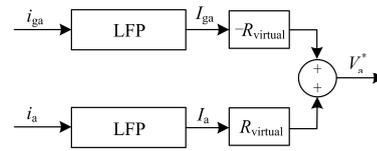


图 18 直流虚拟电阻实现励磁涌流抑制示意图

Fig. 18 Excitation inrush current suppression schematic diagram by DC virtual resistance

6 虚拟阻抗应用实例

2009 年，李云伟教授团队搭建了一个由两台分布式电源并联组成的微网系统平台。该微网系统由现场可编程门阵列控制，通过采用虚拟阻抗技术，该微网系统可实现功率解耦和无功精确分配；2016 年，卓放教授团队搭建了一个由两台分布式电源并联组成的微网平台，两台分布式电源由 DSP TMSF2812 芯片控制，每台 DG 的额定功率为 5 kVA。由于采用了虚拟阻抗与遗传算法的复合控制，该微网系统能够较好地实现无功功率的精确分配^[48]。

2012 年，李云伟教授团队制造了一台恒直流电压源逆变器样机，开关频率 10 kHz，系统由 DS1006 dSPACE 控制。该逆变器样机由于采用了虚拟谐波阻抗控制，可以较好地抑制谐波^[36]。2014 年，李云伟教授团队在上述样机中通过输出电流分量形成虚拟基波阻抗，减弱了系统的谐振^[35]。2014 年，阮新波教授团队搭建了一台容量 6 kW 的逆变器样机，该样机在电流控制环的出口处构建了虚拟阻抗环，重塑输出阻抗特性，增强了系统的鲁棒性和高次谐波排斥能力^[22]。

文献[49]搭建了一个由两台逆变器、一台光伏发电机和公共负荷组成的孤岛微网平台。该微网平台通过自适应虚拟阻抗实现电压调整，通过虚拟频率-阻抗实现频率调整。该微网平台可以满足光伏系统对控制速度的要求。

文献[50]为一个由 PWM 整流器和飞轮储能组成的快速充电站设计了层级控制。由于应用了虚拟阻抗控制，该充电站不依赖数字信息传递便可实现功率平衡和直流电压调整，进而减弱了电动汽车突然充电引起的峰值功率振荡。

7 发展趋势和关键问题聚焦

前文已经详细探讨了虚拟阻抗技术较为成熟的具体应用场景，本节将主要探讨虚拟阻抗技术未来的发展趋势和可能遇到的关键问题。

虚拟阻抗环与电压电流环直接相连，受电压电流环动态特性影响较大。同时，微网中线路阻抗的

数值呈动态变化, 因此已经由虚拟阻抗重塑过的阻抗特性可能会受到电压、电流和线路阻抗动态变化的影响。因此, 可以实时整定的自适应虚拟阻抗是虚拟阻抗技术发展的一个趋势^[51-57]。目前已有文献对自适应虚拟阻抗技术进行了相关研究: 文献[52]将无功功率、不平衡功率和谐波功率做为主动扰动, 接入到传统有功-频率下垂控制中, 在瞬时有功和虚拟阻抗之间建立起耦合关系, 实现对虚拟阻抗的实时调整。文献[53]将实时监测的等效馈线电流引入到下垂控制中, 实现了虚拟阻抗的实时调整。文献[54]通过在各个逆变器之间形成信息传递来实现虚拟阻抗的自动调整, 当信息传递断开时, 控制方式恢复到传统的下垂控制。

要求虚拟阻抗实现某种功能时, 往往只能应用一种实现结构, 即通过虚拟阻抗实现的一系列良好性能往往不能兼得。但虚拟阻抗技术实现简单、不需要增加额外投资, 如果在各个虚拟阻抗结构中找到兼容性结构, 将会是虚拟阻抗技术的一大突破。但与此同时, 虚拟阻抗性能的衡量指标可能会变得更加复杂。

再者, 虚拟阻抗只是依据阻抗与电压电流的物理关系构造而成, 是真实阻抗的一种不完全模拟。虚拟阻抗与真实阻抗之间是否存在相互影响, 以及这种影响的产生机理是目前研究中鲜有涉及的一个点。

最后, 虚拟阻抗是一种控制方法, 通过该方法可以构造出一些物理上并不存在的元件, 比如忆阻器^[58], 如图 19 所示。

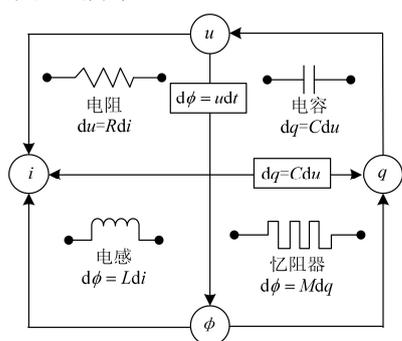


图 19 二端口元件关系示意图^[59]

Fig. 19 Relationship between the two port components

忆阻是表征磁通和电荷关系的物理量, 其阻值由一段时间内流经忆阻器的电荷总量决定, 在断电状态下其阻值仍保持不变, 即具有记忆特性^[59], 因此可通过忆阻器来制造理想的存储器, 这也是将来研究中一个可能的创新点。

8 结语

在微电网中, 灵活高效地控制逆变单元对于可再生能源的利用具有十分重要的意义。虚拟阻抗技术可以使控制性能进一步优化, 而且实现简单, 不需要额外的投资, 在当前具有广阔的研究前景。

本文在总结了大量国内外相关文献的基础上, 对虚拟阻抗在下垂控制优化、谐波抑制、谐振抑制、故障电流限制和励磁涌流抑制中起到的作用进行了全面的综述, 详细介绍了其相应功能的实现方法, 并根据自适应虚拟阻抗等现阶段的研究热点探讨了未来虚拟阻抗技术的研究趋势和可能遇到的关键问题。希望本文能为虚拟阻抗技术的发展提供有益参考, 不断推进虚拟阻抗技术在微电网中的广泛应用。

参考文献

- [1] PIAGI P, LASSETER R H. Autonomous control of microgrid[C] // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [2] MOROZUMI S. Micro-grid demonstration projects in Japan[C] // Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC '07, 2007.
- [3] LASSETER R H. Microgrids[C] // Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, 2002.
- [4] HATAIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [5] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8. DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [6] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70. YANG Xinfā, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [7] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[C] // Power Electronics Specialist Conference, 2003.
- [8] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.

- [9] HE J, LI Y W, 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.
- [10] HE J, LI Y W, MUNIR M S. A flexible harmonic control approach through voltage-controlled grid interfacing converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(1): 444-455.
- [11] WANG X, BLAABJERG F, CHEN Z. An improved design of virtual output impedance loop for droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters[C] // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.
- [12] LI Y W, VILATHGAMUWA D M, LOH P C, et al. A dual-functional medium voltage level DVR to limit downstream fault currents[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(4): 1330-1340.
- [13] ZHU Y, LIU B, WANG F, et al. A virtual resistance based reactive power sharing strategy for networked microgrid[C] // 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015.
- [14] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, SAVAGHEBI M, et al. Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1271-1280.
- [15] GUERRERO J M, MATAS J, CASTILLA M, 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.
- [16] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control for voltage quality enhancement in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4): 1893-1902.
- [17] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(2): 797-807.
- [18] MATAS J, CASTILLA M, VICU L, et al. Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12): 2993-3002.
- [19] GUERRERO J M, MATAS J, CASTILLA M, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [20] ZHANG X, RUAN X, ZHONG Q C. 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.
- [21] GADELOVITS S. Impedance shaping for parallel operation of inverters in islanded AC microgrids[C] // *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2015.
- [22] PAN D, RUAN X, BAO C, et al. Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(7): 3414-3427.
- [23] YANG D, RUAN X, WU H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [24] YANG D, RUAN X, WU H. Using virtual impedance network to improve the control performances of LCL-type grid-connected inverter under the weak grid condition[C] // 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, 2014.
- [25] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(3): 1598-1608.
- [26] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158-172.
- [27] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗的改进下垂控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(16): 7-13.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. An improved droop control strategy based on virtual impedance in islanded micro-grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(16): 7-13.
- [28] 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.
- [29] HOU G, XING F, YANG Y, et al. Virtual negative impedance droop method for parallel inverters in microgrids[C] // Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015.
- [30] 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-EPSA, 2014, 26(3): 66-71.
- [31] HADDADI A, JOOS G. Load sharing of autonomous distribution-level microgrids[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011.
- [32] HE J, LI Y W. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2525-2538.
- [33] 郎维川. 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 30-31, 39.
LANG Weichuan. Generation and harm of harmonic in power supply system and the countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 30-31, 39.
- [34] BHATTACHARYA S, CHENG P T, 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.
- [35] WANG X, BLAABJERG F, CHEN Z. 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.
- [36] WANG X, BLAABJERG F, CHEN Z. 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.
- [37] HE J, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [38] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [39] GUERRERO J M, MATAS J, VICUNA L, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [40] PLET C A, GREEN T C. A method of voltage limiting and distortion avoidance for islanded inverter-fed networks under fault[C] // Power Electronics and Applications, 2011.
- [41] 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.
- [42] PAQUETTE 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.
- [43] BLAABJERG F, LISERRE M, MA K. Power electronics converters for wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 708-719.
- [44] CHEN Z, GUERRERO J M, BLAABJERG F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(8): 1859-1875.
- [45] CHEN H C, KO H C, CHENG P T. 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, 2013.
- [46] HAGIWARA 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.
- [47] 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.
- [48] ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2890-2904.
- [49] SHI Hongtao, ZHUO Fang, YI Hao, et al. A novel real-time voltage and frequency compensation strategy for photovoltaic-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3545-3556.
- [50] CHEN Zhi, PEI Xuejun, ZHU Wenjing, et al.

- combined control strategy for parallel operation of inverter[C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2015.
- [51] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [52] HE J, LI Y W, BLAABJERG F. An enhanced islanding microgrid reactive power, imbalance power, and harmonic power sharing scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3389-3401.
- [53] ZHU Y, ZHUO F, WANG F, et al. A wireless load sharing strategy for islanded microgrid based on feeder current sensing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6706-6719.
- [54] MAHMOOD H, MICHAELSON D, JIANG J. Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1605-1617.
- [55] 赵新, 吴学智, 李葛亮, 等. 利用虚拟阻抗改善电励磁同步发电机弱磁控制性能[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 49-56.
ZHAO Xin, WU Xuezhi, LI Geliang, et al. Improving the flux weakening control performance of electrically excited synchronous generators based on virtual impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 49-56.
- [56] 刘斌, 卢雄伟, 熊勇, 等. 负荷按容分配的无线并联逆变系统收敛性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 90-98.
LIU Bin, LU Xiongwei, XIONG Yong, et al. Convergence of the wireless parallel inverter system with volume-based load sharing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 90-98.
- [57] 周啸, 金新民, 唐芬, 等. 微电网孤岛工况下基于四桥臂变流器的不平衡负载分配策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 76-86.
ZHOU Xiao, JIN Xinmin, TANG Fen, et al. Four-leg converter based unbalanced load sharing method in islanding microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 76-86.
- [58] CHUA L. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519.
- [59] 胡舒凯, 吴俊杰, 周海芳, 等. 忆阻器存储研究与展望[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(增刊 1): 79-84.
HU Shukai, WU Junjie, ZHOU Haifang, et al. Research and prospect on memristor memory[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(S1): 79-84.

收稿日期: 2016-05-01; 修回日期: 2016-12-13

作者简介:

袁 敞(1981-), 男, 博士, 讲师, 从事新能源电网、电力电子技术在电力系统中的应用等方面的研究; E-mail: yc_ncepu@163.com

丛诗学(1989-), 男, 硕士研究生, 从事新能源电网、电力电子技术在电力系统中的应用等方面的研究; E-mail: 770649650@qq.com

徐衍会(1978-), 男, 博士, 副教授, 从事动态电力系统分析与负荷建模等方面的研究。E-mail: xuyanhui23@sohu.com

(编辑 姜新丽)