

提高并网逆变器在弱电网下鲁棒稳定性的改进电压前馈方法

陈 博¹, 曾成碧¹, 苗 虹¹, 常 宏²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610000; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要: 由于弱电网中电网阻抗的存在, 采用电压前馈控制会对逆变器系统的稳定性产生不利影响。为保留电压前馈控制的优点, 首先根据阻抗稳定性分析的方法, 分析弱电网中电网阻抗变化时采用电压前馈控制出现的问题, 并指出失稳原因和不稳定区域。其次, 提出相位超前补偿的方法, 增大逆变器输出阻抗的相角, 减小由电压前馈控制引起的不稳定区域, 保证当电网阻抗变化时, 该系统仍具有较强的鲁棒性。最后在 Matlab/Simulink 进行仿真, 仿真结果验证该方法的有效性和可行性。

关 键 词: 并网逆变器; 弱电网; 电网阻抗; 电压前馈控制; 相位超前补偿

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.014 中图分类号: TM46 文章编号: 1673-9140(2021)03-0118-07

Improved voltage feedforward method for improving robust stability of grid-connected inverters in weak grids

CHEN Bo¹, ZENG Chengbi¹, MIAO Hong¹, CHANG Hong²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China;

2. China Yangtze Electric Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: Due to the existence of grid impedance in a weak grid, the application of voltage feedforward control can adversely affect the stability of the inverter system. In order to preserve the advantages of voltage feedforward control, according to the impedance stability analysis method, the problems in adopting voltage feedforward control under grid impedance variation in weak grids are studied. Instability mechanism and unstable region are also presented. Based on the analysis, a phase lead compensation method is proposed to reduce the unstable region caused by voltage feedforward control, increase the phase angle of the inverter output impedance, and safeguard strong robustness to the system when the grid impedance varies. Finally, the simulation experiment is tested in Matlab/Simulink. Simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: grid-connected inverter; weak grid; grid impedance; voltage feedforward control; phase lead compensation

随着大量分布式电源的接入,电网越来越表现出弱电网的特性^[1-2],主要表现为以下 2 个特点:①电网阻抗不可被忽略,且电网阻抗随电网结构而变化;②并网电流包含低次谐波。在弱电网中,由于并网逆变器易出现 LCL 谐振问题,故采用电容电流和并网电流的双环电流控制方法^[3-4]。并且为抑制因电网失真引起的低次电流谐波,使得电压前馈控制得到了广泛地应用^[5-7]。然而,当电力电子设备在公共连接点(point of common coupling, PCC)接入电网时,PCC 处电网阻抗将会变化非常大,且不可被忽略。文献[8-9]提出在弱电网下,电压前馈控制会导致系统控制性能下降,对系统稳定性产生不利影响。针对这一问题,相关学者进行了大量的研究。

基于阻抗的稳定性评估方法已被证明是一种判定逆变器稳定性的有效方法^[10-14]。文献[15]研究了基于广义的奈奎斯特判据在三相 L 型逆变器中电压前馈控制的影响,但逆变器多用于 LCL 型系统中,该方法的稳定性还未被评估;文献[16]提出通过降低电压前馈增益来提高并网逆变器的稳定裕度,该方法在一定程度上提高了系统的稳定性,但电压前馈增益的减小会使逆变器输出阻抗的减小,不利于并网电流低次谐波的抑制;文献[17]提出一种自适应电流控制来提高控制性能,但需要实时监测电网阻抗,并可能产生由微分电压前馈带来的噪音。虽然以上方法能取得较好的效果,但系统设计的复杂性也大大增加,并且均未涉及通过增加相位超前或滞后补偿来提高并网逆变器的稳定裕度,使其对变化的电网阻抗具有较强的鲁棒性。

对此,该文首先基于阻抗稳定性判据对带有电压前馈控制的单相并网逆变器稳定性进行分析,研究失稳原因并指出由电压前馈造成的不稳定区域;然后通过引入相位超前补偿增大逆变器输出阻抗的相角,减小由电压前馈造成的不稳定区域,提高了系统的鲁棒性;最后通过仿真验证所提控制策略的有效性。

1 基于电压前馈的双环电流控制

一种典型的采用电容电流和并网电流反馈控制的 LCL 型并网逆变器^[18]的结构如图 1 所示。LCL

滤波器包括一个逆变器侧电感 L_1 、滤波电容 C 、电网侧电感 L_2 。图中, U_{in} 为直流电源, U_{inv} 为逆变器输出电压, i_1 为逆变器输出电流, i_c 为电容电流, i_g 为并网电流。弱电网以一个理想电压源 U_g 串联电网阻抗 Z_g 代替。

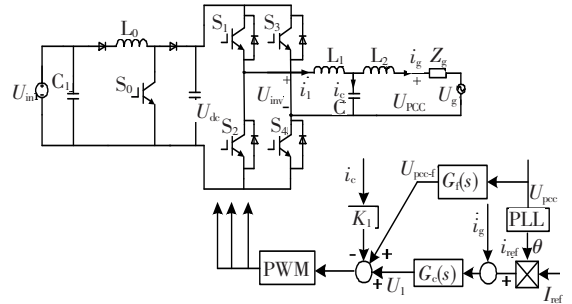


图 1 LCL 型并网逆变器结构

Figure 1 Structure diagram of LCL-type grid-connected inverter

电网电压前馈的双环电流控制方案如图 2 所示,图中, i_{ref} 为电流参考值, K_{pwm} 为逆变器增益, $G_c(s)$ 为 PI 电流控制器函数, K_1 为电容电流反馈系数; $G_f(s)$ 为并网电压反馈函数。

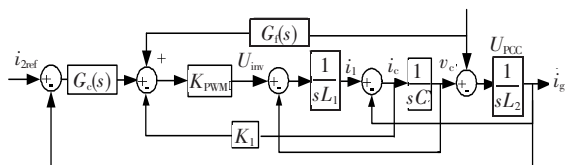


图 2 弱电网下的典型电流双环控制结构

Figure 2 Typical dual-loop current control structure in the weak grid

由图 2 可以得到:

$$[(i_{ref} - i_g) \cdot G_c(s) - i_c \cdot k_1 + u_{pcc} \cdot G_f(s)]K_{pwm} = i_1 \cdot sL_1 + i_g \cdot sL_2 + u_g \quad (1)$$

由式(1)可知,当并网电压反馈函数 $G_f(s)$ 等于 $1/K_{pwm}$ 时,电流控制器 $G_c(s)$ 仅负责输出 2 个电感器两端电压的参考值。因此,电压前馈有 2 个优点:①由于减少了电流控制器的负担,实现了启动过程中的快速响应;②当并网电压反馈函数 $G_f(s)$ 等于 $1/K_{pwm}$ 时,式(1)两边的电压 U_g 相互抵消,消除了并网电压对并网电流的影响,提高了功率因数并抑制低频谐波。介于以上优点,电压前馈控制广泛应用于单相逆变器中。

2 带相位超前补偿器的电压前馈控制

2.1 弱电网中电网阻抗变化时采用电压前馈出现的问题

由于在弱电网^[19]中电网阻抗不能被忽略,因而电压 $U_{\text{pcc}} = i_{\text{g}} Z_{\text{g}} + U_{\text{g}}$ 。因此,电压前馈控制会带来额外的正反馈 i_{g} 和反馈因数 Z_{g} 。由图 2 可知, i_{ref} 到 i_{g} 的开环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{K_{\text{pwm}} G_{\text{c}}(s)}{L_1 L_2 C s^3 + K_1 K_{\text{pwm}} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (2)$$

$$G_{\text{c}}(s) = k_{\text{p}} + \frac{k_{\text{i}}}{s} \quad (3)$$

U_{pcc} 到 i_{g} 的开环传递函数为

$$G_2(s) = \frac{1}{Z_{\text{inv}}(s)} + \frac{1}{Z_{\text{f}}(s)} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_{\text{inv}}(s) = \frac{H(s)}{L_1 C s^2 + K_1 K_{\text{pwm}} C s + 1} \\ Z_{\text{f}}(s) = \frac{-H(s)}{K_{\text{pwm}} G_{\text{c}}(s)} \end{cases} \quad (5)$$

$$H(s) = L_1 L_2 C s^3 + K_1 L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s + K_{\text{pwm}} G_{\text{c}}(s) \quad (6)$$

式(4)~(6)中 $Z_{\text{inv}}(s)$ 为逆变器未加前馈控制的等效输出阻抗; $Z_{\text{f}}(s)$ 为电压前馈控制环等效阻抗。

由式(2)、(3)可知,并网电流 i_{g} 为

$$i_{\text{g}}(s) = i_{\text{s}}(s) - G_2(s) U_{\text{pcc}}(s) = G_1(s) i_{\text{ref}}(s) - \frac{U_{\text{pcc}}(s)}{Z_{\text{inv}}(s)} - \frac{U_{\text{pcc}}(s)}{Z_{\text{f}}(s)} \quad (7)$$

式中 $i_{\text{s}}(s)$ 为逆变器等效电流源。

由式(7)可知,单相逆变器等效电路如图 3 所示,则带电压前馈控制的逆变器等效输出阻抗为

$$Z_{\text{inv_eq}}(s) = \frac{Z_{\text{inv}}(s) Z_{\text{f}}(s)}{Z_{\text{inv}}(s) + Z_{\text{f}}(s)} \quad (8)$$

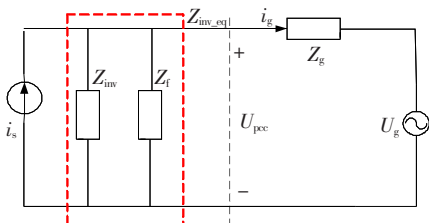


图 3 并网逆变器的等效电路

Figure 3 Equivalent circuit of grid-connected inverter

考虑到最坏的情况,电网阻抗被认为是纯电感元件。

为明确区分由电压前馈控制引起的不稳定区域,该文采用基于阻抗的稳定性分析方法。基于此方法,电网阻抗和逆变器输出阻抗之比 $Z_{\text{g}}/Z_{\text{inv}}$ 需满足奈奎斯特判据,即当 Z_{g} 和 Z_{inv} 在 f_i 处相交时,相角裕度(phase margin, PM)需大于零: $P_{\text{M}} = 180 - \arg[Z_{\text{g}}(j\omega_i)] + \arg[Z_{\text{inv}}(j\omega_i)] > 0$ 。由于纯电感阻抗相角为 90° ,则稳定条件可简化为 $\arg[Z_{\text{inv}}(j\omega_i)] > -90^\circ$ 。

如图 4 所示,将 $Z_{\text{inv}}(s)$ 和 $Z_{\text{inv_eq}}(s)$ 波特图进行比较。当加入电压前馈控制后,幅值裕度和相角裕度很大程度地减少,低频处的 $\arg[Z_{\text{inv_eq}}(j\omega_i)] < -90^\circ$,系统出现不稳定区域。当 $Z_{\text{g}} = 1 \text{ mH}$ 时, $Z_{\text{g}}(s)$ 、 $Z_{\text{inv_eq}}(s)$ 和 $Z_{\text{inv}}(s)$ 相交于点 A,此时的频率为 f_i , $Z_{\text{inv_eq}}(s)$ 的相角裕度远小于 $Z_{\text{inv}}(s)$ 的相角裕度。随着 L_{g} 的增大,相角裕度逐渐减小。当 $Z_{\text{g}} > 3 \text{ mH}$ 时, $P_{\text{M}} < 0$ 。从图 4 可以看到,当 $Z_{\text{g}} = 4 \text{ mH}$ 时, $\arg[Z_{\text{inv_eq}}(j\omega_i)] < -90^\circ$,加入电压前馈控制的逆变器将变得不稳定。如果 Z_{g} 变得非常大,那么大量的电网电流谐波将很容易触发逆变器的保护^[20]。

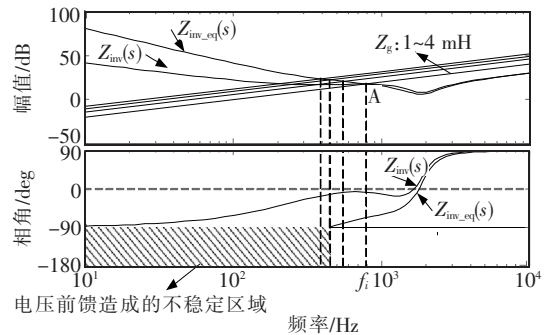


图 4 $Z_{\text{inv_eq}}(s)$ 和 $Z_{\text{inv}}(s)$ 的波特特性

Figure 4 Bode diagram of $Z_{\text{inv_eq}}(s)$ and $Z_{\text{inv}}(s)$

2.2 相位超前补偿方法

由于电压前馈控制导致相角裕度大幅度减小,且出现不稳定区域,因此该文采用相位超前补偿来增大逆变器的输出阻抗相角,提高系统的鲁棒性。如图 5 所示,在正向通路上添加相位超前补偿,补偿函数为

$$G_i(s) = \frac{as + 1}{bs + 1} \quad (9)$$

式中 a 、 b 均为常数。具体确定方法如下。

首先根据补偿函数 $G_i(s)$ 写出对应的相频函数,即

$$G_i(\omega) = \arctan[\omega(a-b)/(1+ab\omega^2)] \quad (10)$$

然后令 $dG_i(\omega)/d\omega=0$, 可求得产生最大相角补偿处的频率公式,即

$$\omega_m = \sqrt{\frac{1}{ab}} \quad (11)$$

将 ω_m 代入相频函数 $G_i(\omega)$ 中, 得到最大补偿相角, 即

$$\theta_{\max} = \arctan \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{a}{b}} - \sqrt{\frac{b}{a}} \right) \quad (12)$$

最后根据所需的相角裕度设计最大补偿相角以及令最大相角补偿处的频率等于阻抗比的对角频率, 将这 2 个量代入式(11)、(12)中, 即可求出常数 a 、 b 的值。

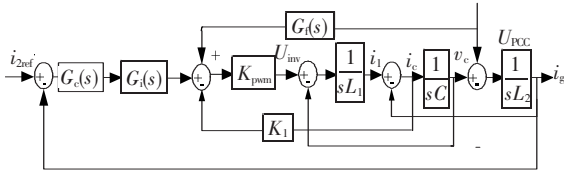


图 5 加入相位超前补偿后的双环电流控制结构
Figure 5 Dual-loop current control structure after adding phase-lead compensation

加入相位超前补偿后, i_{ref} 到 i_g 的开环传递函数为

$$G'_1(s) = \frac{K_{pwm} G_c(s) G_i(s)}{L_1 L_2 C s^3 + K_1 K_{pwm} G_i(s) L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (13)$$

i_{ref} 到 U_{pcc} 的开环传递函数为

$$G'_2(s) = \frac{1}{Z_{inv_eq}^*(s)} + \frac{1}{Z_f(s)} \quad (14)$$

结合式(13)、(14)可得加入相位超前补偿后逆变器等效输出阻抗为

$$Z_{inv_eq} = \frac{L_1 L_2 C s^3 + K_1 K_{pwm} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s + K_{pwm} G_i(s) G_c(s)}{L_1 C s^2 + K_1 K_{pwm} C s + 1 - K_{pwm} G_f(s)} \quad (15)$$

考虑在理想的条件下设计参数, 增加相位超前补偿不会改变电流调节器参数, 在选择临界频率 f_x 和最大相位补偿角 θ_{\max} 时, 需权衡电流控制器的带宽和相位增益都随相角的增加而变化的影响。为了

保证良好的动态响应和稳定性, 在无相位超前补偿时, 临界频率 f_x 对应的相角补偿最大不超过 25° 。

$Z_{inv_eq}(s)$ 和 $Z_{inv_eq}^*(s)$ 的波特图如图 6 所示。在添加相位超前补偿后, 由电压前馈控制导致的不稳定区域明显减小了。当 $\arg[Z_{inv_eq}(j\omega)] = -90^\circ$ 时, $Z_{inv_eq}^*(s)$ 的相角超前 20.5° , 也就是添加相角超前补偿后, 相角裕度增大为 20.5° , 从而提高对电网阻抗变化的鲁棒性。例如, 当 $Z_g = 5 \text{ mH}$ 时, 没加相位超前补偿的逆变器输出阻抗相角小于 -90° , 造成系统不稳定。在加入相位超前补偿后, $P_M > 0$, 达到稳定要求。

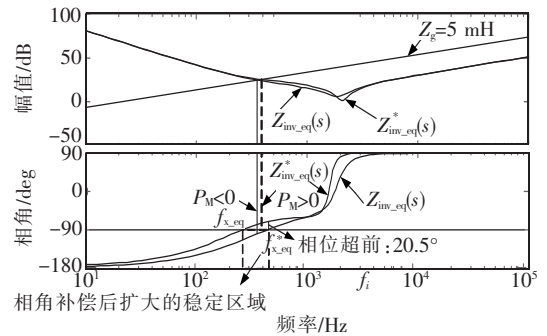


图 6 $Z_{inv_eq}(s)$ 和 $Z_{inv_eq}^*(s)$ 的波特特性
Figure 6 Bode diagram of $Z_{inv_eq}(s)$ and $Z_{inv_eq}^*(s)$

3 仿真结果和分析

为了验证该方法的有效性和可行性, 在 Matlab/Simulink 进行仿真, 仿真主要参数如表 1 所示。

表 1 逆变器相关参数

Table 1 Parameters of the inverter			
参数	数值	参数	数值
U_{in}/V	400	P_0/kW	4
L_1/mH	0.75	L_2/mH	0.35
$C/\mu F$	10	K_1	0.027
K_{pwm}	400	G_f	1/400
k_p	0.018	k_i	30
a	1/8 000	b	1/16 000

首先通过仿真比较添加电压前馈控制前后的逆变器系统, 如图 7 所示, 当 $Z_g = 4 \text{ mH}$ 时, 并网电流 i_g 的仿真波形。当 $t = 0.25 \text{ s}$ 时, 由于 P_M 足够大, 逆变器系统在没有电压前馈控制的情况下是稳定

的。当添加电压前馈后,它会因严重失真的电流而开始变得不稳定。

如图 8、9 所示,当电网阻抗 Z_g 分别为 2 mH 和 4 mH 时,未加入相位超前补偿和加入该补偿的并网电流波形。由图 8 可知,随着电网阻抗 Z_g 的增大,会导致并网电流的失真并出现不稳定现象。

添加相位超前补偿后的并网电流波形如图 9 所示。很明显,未加入相位超前补偿控制的并网电流中存在大量谐波,通过添加相位超前补偿,改善了并网电流 i_g ,特别是当电网阻抗 Z_g 较大时,这与分析结果十分吻合。

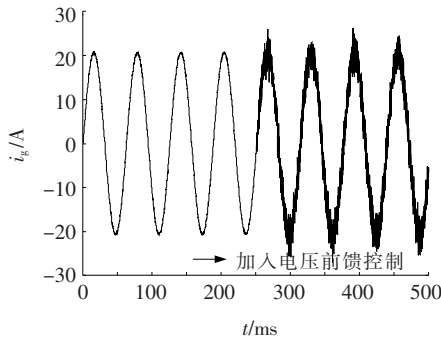


图 7 Z_g 为 4 mH 时加入电压前馈控制前后并网电流波形
Figure 7 Grid current waveforms before and after adding voltage feed-forward control when Z_g is 4 mH

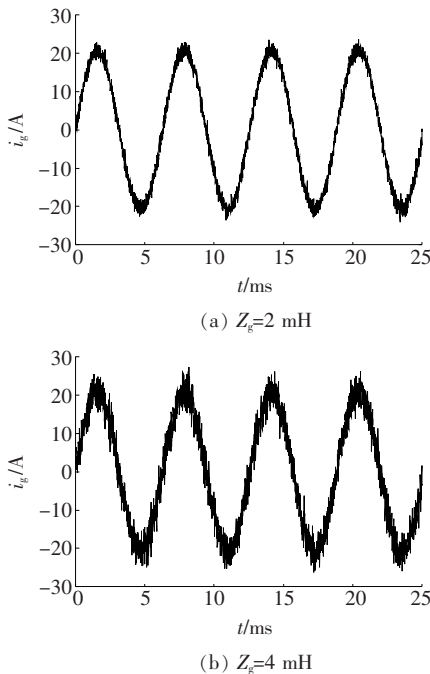


图 8 加入相位超前补偿前的并网电流波形
Figure 8 Grid current waveforms before adding phase-lead compensation

另外,如图 10 所示,当电网阻抗为 4 mH 时,加入相位超前补偿前后的并网电流谐波畸变率从 5.51% 降到 2.69%,满足并网电流谐波标准。进一

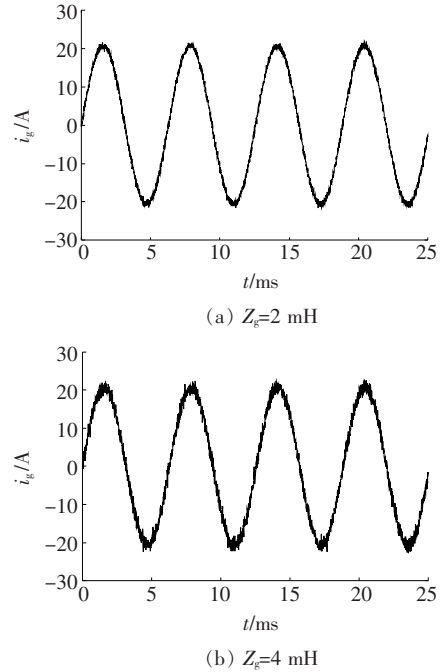


图 9 加入相位超前补偿后的并网电流波形
Figure 9 Grid current waveforms after adding phase-lead compensation

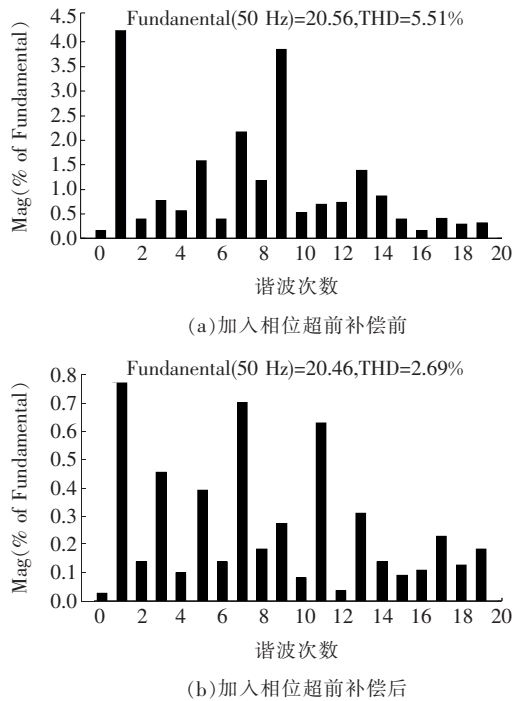


图 10 Z_g 为 4 mH 时加入相位超前补偿前后的并网电流谐波分析
Figure 10 Harmonic analysis of grid-connected current before and after the phase-lead compensation is added when Z_g is 4 mH

步说明了相位超前补偿能改善波形质量,并验证了在弱电网下电网阻抗较大时仍能保证并网逆变器的稳定运行。

4 结语

该文采用阻抗稳定性的分析方法,研究了电压前馈控制对单相并网逆变器稳定性的不利影响。首先利用该方法,可以清晰地得到由电压前馈引起的不稳定区域,并且获得逆变器保持稳定的最大电网阻抗范围。然后为解决由电压前馈而引起的逆变器输出阻抗相角大幅度减小的问题,提出一种新的相位超前补偿方法增大逆变器输出阻抗的相角,减小不稳定区域,使系统对于变化的电网阻抗具有较强的鲁棒性。最后在 Matlab/Simulink 上进行仿真,验证所提控制策略不仅能提高并网逆变器稳定性,而且还能改善并网电流波形。

参考文献:

- [1] 王孝琳,郝超超,李晓明,等.含分布式电源的配电网脆弱性分析[J].电测与仪表,2019,56(6):38-43.
WANG Xiaolin, HAO Chaochao, LI Xiaoming, et al. The vulnerability analysis of distribution network with distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 38-43.
- [2] 贾健飞,李博通,孔祥平,等.计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J].高压电器,2019,55(2):149-155.
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 149-155.
- [3] Dannehl J, Fuchs F W, Thøgersen P B. PI state space current control of grid-connected PWM converters with LCL filters[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2010, 25(9): 2320-2330.
- [4] Dannehl J, Fuchs F W, Hansen S, et al. Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with LCL filters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1509-1517.
- [5] 王玉良,朱玲,项颂,等.直驱风电机组与弱电网交互作用稳定分析[J].中国电力,2019,52(9):118-125.
WAN Yuliang, ZHU Ling, XIANG Song, et al. Stability analysis of interaction between direct drive wind turbine and weak grid[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 118-125.
- [6] Yan Q, Wu X, Yuan X, et al. An improved grid-voltage feedforward strategy for high-power three-phase grid-connected inverters based on the simplified repetitive predictor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3880-3897.
- [7] 杨龙月,郭锐,张乐,等.非理想电网下逆变器并网电流质量改善策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):10-18.
YANG Longyue, GUO Rui, ZHANG Le, et al. Improvement strategy for grid-connected current quality of an inverter under non-ideal grid conditions [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 10-18.
- [8] Xu J, Xie S, Tang T. Evaluations of current control in weak grid case for grid-connected LCL-filtered inverter [J]. IET Power Electronics, 2013, 6(2): 227-234.
- [9] 许泽铭,谢少军,唐婷.弱电网下 LCL 滤波并网逆变器自适应电流控制[J].中国电机工程学报,2014,34(24):4031-4039.
XU Jinming, XIE Shaojun, TANG Ting. An adaptive current control for grid-connected lcl-filtered inverters in weak grid case [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4031-4039.
- [10] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [11] Li W, Ruan X, Pan D, et al. Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter [J]. IEEE Transactions on, Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2237-2250.
- [12] 李小强,伍小杰,耿乙文,等.感性电网阻抗下三相光伏逆变器稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2906-2916.
LI Xiaoqiang, WU Xiaojie, GENG Yiwen, et al. Stability analysis of three-phase PV inverter under inductive grid impedance condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2906-2916.

- [13] Yang D S, Ruan X B, Wu H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [14] 陈新, 王贇程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094+2223.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094 + 2223.
- [15] 王鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-192.
WANG He, LUAN Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-192.
- [16] 钱强, 谢少军, 季林, 等. 一种提升逆变器对电网适应能力的电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6193-6201.
QIAN Qiang, XIE Shaojun, JI Lin, et al. A current control strategy to improve the adaptability to utility for inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6193-6201.
- [17] Xu J, Xie S, Tang T. Improved control strategy with grid-voltage feedforward for LCL-filter-based inverter connected to weak grid[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(10): 2660-2671.
- [18] 赵兴勇, 贺天云, 陈浩宇, 等. 多功能逆变器在微电网储能系统中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 36-43.
ZHAO Xingyong, HE Tianyun, CHEN Haoyu, et al. Application of multifunctional inverter in energy storage system of micro-grid[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 36-43.
- [19] 葛延峰, 孙颖, 韩子娇, 等. 永磁同步风电机组的主动支撑控制及其在弱电网下的适应性分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 62-69.
GE Yanfeng, SUN Ying, HAN Zijiao, et al. Active Support control strategy of permanent magnet synchronous wind turbine and its adaptability analysis under weak grid[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 62-69.
- [20] 张阳, 陈新, 王昀, 等. 弱电网下并网逆变器的阻抗相角动态控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 97-106.
ZHANG Yang, CHEN Xin, WANG Yun, et al. Impedance-phased dynamic control method of grid-connected inverters under weak grid condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 97-106.