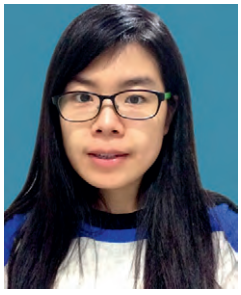
具有低电压穿越功能的微电网并网逆变器的控制策略的研究

为了使微型电网中的分布式电源能够穿越主网的低电压故障，提出了一种新型数字控制式微网并网逆变装置。当主网出现故障，同时微网在向主网送电时，数字控制系统能够有效地限制并网逆变装置的输出电流，避免因过电流保护动作导致的逆变器跳闸或过热击穿。此外，数字控制技术在主网出现三相不平衡故障时，能够保证并网逆变装置输出平滑的功率。故障清除后，并网逆变器恢复正常运行状态，并输出与故障前等量的有功功率和无功功率，从而避免系统失去稳定。仿真和实验结果都验证了该微电网低电压穿越技术的有效性。

余潇潇 张凯 左向红 李雪男 舒彬 任雪桂/北京电力经济技术研究院



余潇潇/工程师

关键词/Keywords
微型电网·
低电压穿越技术·
并网逆变器·
不对称故障·
数字控制技术·

0 引言

微电网是指在负荷端组建，包含分布式电源、负荷和储能装置等，可以独立运行控制的小型电力网络单元[1-3]。微型电网既可以与主网进行连接，实现潮流的双向流动，同时也可以工作在孤岛模式[4]。当微型电网工作在并网模式时，如果监测控制装置探测到主网发生故障，并网点开关断开，微电网从并网模式转为孤岛模式运行。这种保护措施为微电网内的负载提供了持续可靠的电源，对敏感负载的稳定运行尤其关键。尽管如此，如果主网故障发生在微电网向主网输送大量有功功率或无功功率时，突然切断微电网将其转为孤岛模式运行，将会导致系统损失大量的有功功率/无功功率出力，有可能导致系统失稳。因此，对于容量较大的并网式微电网，低电压穿越技术对于系统的安全稳定运行非常关键。

国家高科技研究发展计划（863计划）项目（2014AA051901）

微电网中可以包含多种不同类型的分布式电源，如光伏发电系统、微型涡轮机和柴油发电机等，如图1所示。假设一个微电网中包含10台50 MV·A柴油发电机，那么总发电容量可达500 MV·A。在主网网架结构薄弱的情况下，当微电网正向系统注入500 MW有功功率时，如果因低电压故障突然将其切断有可能造成系统失稳。目前，绝大部分小型分布式电源，如柴油发电机，并不具备低电压穿越功能。在含有大量分布式电源的微电网中，如果为每一个分布式电源提供低电压穿越技术，成本将非常昂贵。因此，本文中提出在微电网并网点提升整个微电网的低电压穿越能力。尽管通过串联有源电力滤波器可以对电压跌落进行补偿，从而达到增强微电网低电压穿越的能力[4]。但是，当短路故障较近，并网点电压跌落超过30%时，串联补偿不能够帮助微电网完成故障穿越。

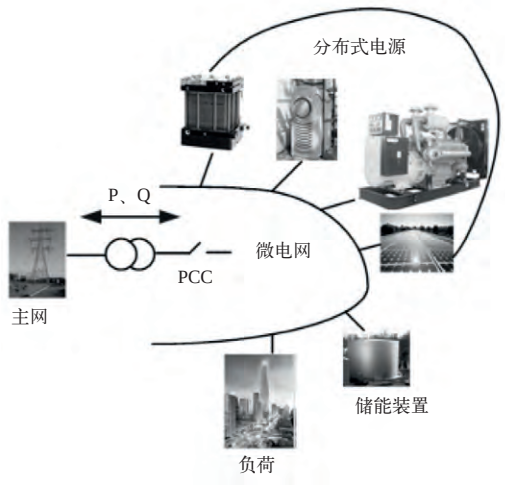


图1 并网式微电网基本结构图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为了实现分布式电源安全稳定的并网运行，有效地限制故障电流是必要条件。大量的分布式电源通过逆变器进行并网接入，而逆变装置中半导体器件的短路电流能力非常有限。因此，实现低电压穿越的关键技术之一就是有效地控制系统故障电流。对于大规模大容量风电和光伏并网，低电压穿越技术已经相对成熟[5]。但是，如何有效地控制故障电流问题并没有被很好地解决。本论文通过着重分析了不同低电压穿越控制策略在限制短路电流方面的优缺点[6-7]。

电网的故障可以分为对称故障和非对称故障。与对称故障相比，非对称故障会在并网点电压中引入负序分量。在非对称故障情况下，瞬时功率理论可以用来对并网点的潮流进行计算[8]。对称分量理论是另一种常用的非对称电力系统潮流计算方法[9]。与瞬时功率理论相比，尽管对称分量理论计算上较为复杂，但是它提供了一种提取负序电流分量的手段。尽管补偿负序电流分量可以使并网点电能质量大大改善，但是因此导致的电压波动不仅增加了逆变器直流侧电容的压力，同时对电网的稳定运行带来了风险。此外，补偿负序电流还对限制故障电流带来更大难度。下面将对瞬时功率理论和对称分量理论进行更深入的比较。

本论文对微型电网并网逆变器提出了一种基于瞬时功率理论的简易控制策略。这种新型控制策略不仅能够限制微电网的故障电流，同时能够在故障时保证潮流的平滑输出。当故障清除后，微电网将对主网注入与故障前等量的功率，从而满足了并网导则中对大功率逆变系统低电压穿越的要求。

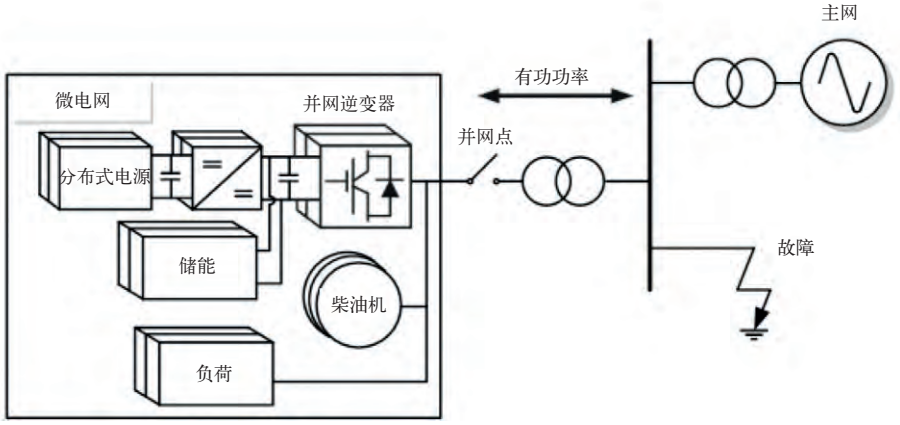


图2 主网出现故障情况下微电网单线示意图

2 低电压穿越的电网指标要求与控制策略比较

低电压穿越技术最早在风力发电系统中应用。考虑到风电场的接入容量及渗透率，并网导则要求在主网出现低电压故障时，风电系统能够穿越故障或不中断供电。考虑到微电网中绝大多数分布式电源都是由逆变器或感应电动机进行并网接入，并网规则中关于二型发电机的低电压穿越规则应为微网并网逆变器的设计准则[10-12]。

如图3所示，当电压跌落在分界线1以上时，分布式电源或微型电网要求保持安全稳定运行；当电压跌落在分界线1与分界线2之间时，分布式电源或者微电网需要与区域调度进行联络来判断运行方式；当电压跌落在分界线2以下时，分布式电源或微电网要求立即切断与主网联络。

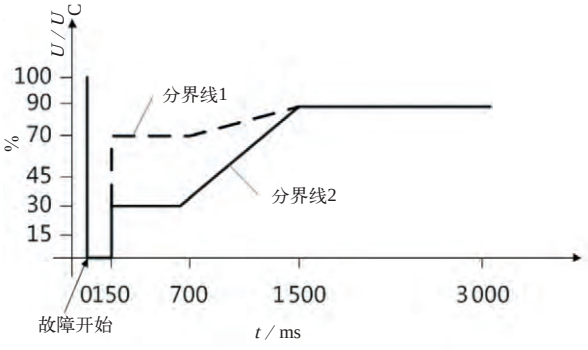


图3 并网规则中二型发电机的低压穿越设计导则

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

微电网与主网在并网点处的潮流可以定义如下

$$P = Vi = (v_a\ v_b\ v_c)(i_a\ i_b\ i_c) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (1)$$

$$Q = V \perp i = (v_a\ v_b\ v_c) \perp (i_a\ i_b\ i_c) = \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_a - v_b) i_c] + (v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b] \quad (2)$$

式中，v和i分别为并网点的电压和电流矢量。式（1）、式（2）适用于系统正常运行情况和故障情况。尽管如此，当系统发生故障时，并网点电压矢量将同时包含正序分量和负序分量。为了分析负序分量对系统潮流的影响，对称分量法对式（1）、式（2）重新整理如下

$$P = Vi = (v^p + v^n)(i^p + i^n) = \bar{P} + \tilde{P} \quad (3)$$

$$Q = V \perp i = (v_\perp^p + v_\perp^n)(i^p + i^n) = \bar{Q} + \tilde{Q} \quad (4)$$

$$\tilde{P} = v^n i^p + v^p i^n \quad (5)$$

$$\tilde{Q} = v_\perp^n i^p + v_\perp^p i^n \quad (6)$$

式中，v^p、v^n分别为电压矢量的正序分量和负序分量；$\bar{P}$和$\bar{Q}$为有功功率和无功功率的恒定分量；$\tilde{P}$和$\tilde{Q}$为负序分量引起的二次潮流波动；这里假设系统中零序分量为0。

图4给出了在非对称故障情况下，电压和电流矢量的关系。如图4所示，在非对称故障情况下控制并网逆变器的输出电流时，可以有三种不同的选择。可以根据瞬时功率计算法，可以将电流矢量控制在与电压矢量平衡的位置；或根据正序分量平衡法，将电流矢量控制在与电压正序矢量平行的位置；或者按照正负序分量控制法，将电流矢量控制在电压正序与负序矢量的差值分量平行的位置。考虑到瞬时功率控制法将电流矢量控制在电压矢量平行的位置，因此在主网发生非对称故障，电压中包含负序分量时，输出功率并不会出现波动。

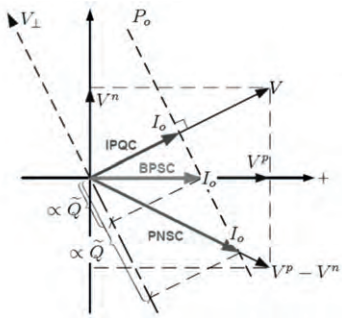


图4 并网逆变器输出电流参考值的不同计算方法

IPQC－瞬时功率控制法 BPSC－正序分量平衡法
PNSC－正负序分量控制法。

对于电压源型逆变器，输出功率的最大波动为

$$\tilde{P}_{pk} = \omega_1 V_{dc} C_{dc} \Delta v_{dc} \quad (7)$$

式中，ω1为基波角频率；V_{dc}为直流侧电压平均值；C_{dc}为直流侧电容值；△V_{dc}为直流侧允许的最大电压波动。

考虑到平衡正序分量法和正序负序分量控制法均会在电压不平衡情况下，导致逆变器输出功率产生波动。因此，本文选择瞬时功率控制法在限制故障电流幅值方面更有优势，更有利于在极端故障情况下保持系统稳定运行。

故障后果最严重的情况发生在微电网向主网系统注入最大容量时。如图4所示，瞬时功率控制策略下，系统电压矢量的最小值是｜V｜；平衡正序分量控制策略下，系统电压矢量的最小值就是系统正序电压的幅值｜V^p｜；正序负序分量控制策略下，系统电压矢量的最小值为｜$V^p - V^n$｜。式（8）～或（10）给出了三种不同控制策略下对应的最大电流输出值。

$$I_{\max,\mathrm{IPQC}} = \frac{P_{inv}}{\frac{3}{2}|V|} \quad (8)$$

$$I_{\max,\mathrm{BPSC}} = \frac{P_{inv}}{\frac{3}{2}|V^p|} \quad (9)$$

$$I_{\max,\mathrm{PNSC}} = \frac{P_{inv}}{\frac{3}{2}(|V^p| - |V^n|)} \quad (10)$$

对于电力电子装置，其允许的最大短路电流为正常运行电流的1.5倍。从式（8）～式（10）可以看出，当最大输出电流水平相同时，瞬时功率控制策略能够注入最大功率，因此在系统发生故障情况下，采用瞬时功率控制法，系统损失功率最小，最容易保持稳定。

与另外两种控制策略相比，瞬时功率控制策略的缺陷在于非对称故障情况下，输出电流发生畸变，电能质量较低。考虑到，并网技术原则对于低电压穿越的要求中并没有对故障时刻逆变器输出电流的电能质量提出要求，因此减少功率损失和波动对于增强系统的故障穿越能力和保证系统稳定更为重要。此外，由于瞬时功率控制法不需要提取电压、电流中的负序分量，因此大大降

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

低了计算复杂度。下一节将介绍如何利用瞬时功率控制法实现微电网的低电压穿越功能。

2 微电网并网逆变器的低压控制策略

2.1 主网与主网侧变压器建模分析

如图2所示，微电网通过升压变压器与中压配电网进行连接。文献中常常把中压配电网模拟成一个理想的无谐波电压源。而本文提出的更深入的配电网模型有助于更准确地衡量并网逆变器的控制策略。此外，中压配电网和升压变压器的建模更有助于研究电网故障对微网并网点电压的影响。

图5 给出了一个多级电力系统模型。如图所示，复杂的多级电力系统可以等效模拟为一个戴维南电路。在已知系统短路水平的情况下，故障阻抗可以由式（11）、式（12）进行计算。

$$Z_{\mathrm{HV}}=\frac{V_{\mathrm{HV}}^2}{S_{\mathrm{SC}}} \tag{11}$$

$$Z_{\mathrm{LV}}=\frac{V_{\mathrm{LV}}^2}{V_{\mathrm{HV}}^2}Z_{\mathrm{HV}} \tag{12}$$

式中，S_{SC}为所接入的配电网的短路容量；Z_{LV}为低电压侧等效短路阻抗。

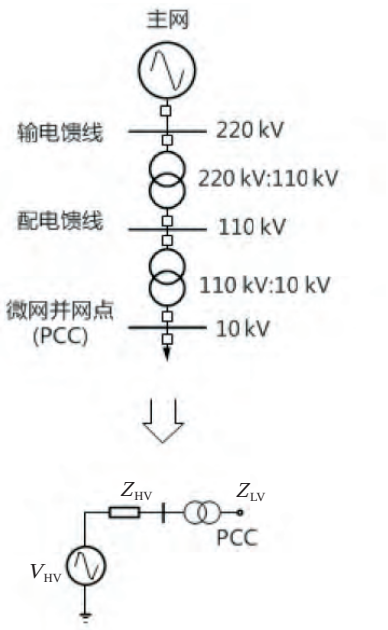


图5 电力系统结构与戴维南等效电路模型

图6给出了并网点配电网与变压器的等效模型，图中L_i'为电网等效感抗；L_l'为变压器漏抗；L_g'为变压器高压侧等效电网阻抗；V_g和L_g为变压器低电压侧电网电压与等效电网感抗。各变量之间的关系如下

$$V_{\mathrm{g},abc}=\frac{1}{N}V_{g,abc}' \tag{13}$$

$$L_g'=L_i'+L_l' \tag{14}$$

$$L_{\mathrm{g}}=\frac{L_g'}{N^2} \tag{15}$$

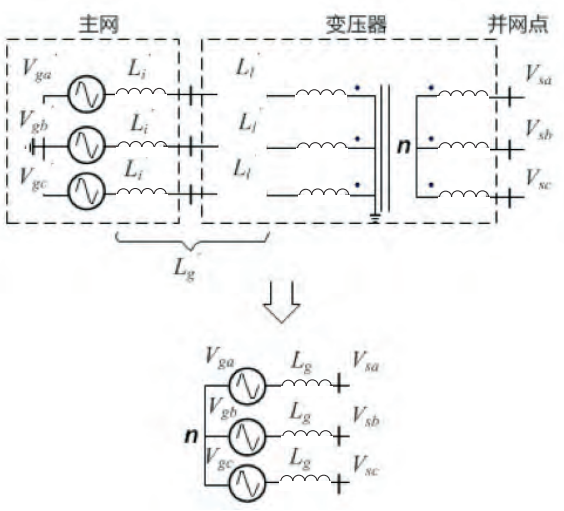


图6 电力系统结构与戴维南等效电路模型

2.2 微电网并网逆变器低压穿越控制策略

图7中给出了微网并网逆变器的控制框图。如图所示，控制系统利用瞬时功率控制策略对逆变器输出电流的参考值进行计算。应用克拉克变换，对并网点的电压和电流矢量进行坐标变换

$$v_{\alpha\beta 0}=Tv_{abc} \tag{16}$$

$$i_{\alpha\beta 0}=Ti_{abc} \tag{17}$$

$$T=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \tag{18}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

瞬时有功功率和无功功率在α β 0坐标系下可以表示为

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{19}$$

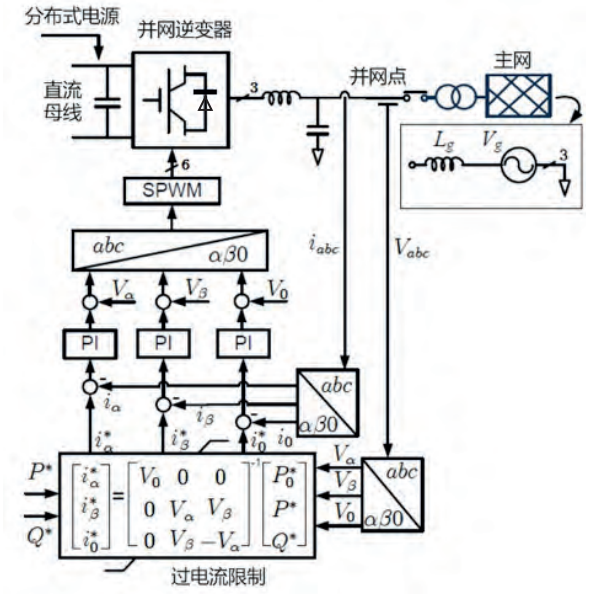


图7　电力系统结构与戴维南等效电路模型

对式（18）、式（19）进行整理，可得出在αβ0坐标系下输出电流的参考值为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_0^* \\ P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \tag{20}$$

从式（20）看出对有功功率和无功功率可以分别选择性进行补偿。在正常运行状态下，无功功率的参考值可以设为0来保证并网点的电能质量和功率因数。然而，在故障情况下，逆变器应该输出无功功率对并网点电压进行支撑。

本文中提出的微网并网逆变器采用比例积分控制算法，并利用电压前馈控制来改善系统的动态特性，提高控制系统对干扰的免疫力。式（8）中计算的输出电流最大值被用来控制逆变器的最大输出电流。

3　仿真与实验结果

3.1　仿真结果

为了验证文中提出的低电压穿越控制策略与故障电流限制算法，对并网逆变器在对称和非对称两种故障情况下分别进行了仿真验证。图8、图9分别展示了在对称故障和非对称故障两种情况下，当并网逆变器输出最大功率时，并网点的输出功率和电流的波形。图8和图9中，虚线表示输出电流的平均值（均方根值）。如图所示，在故障情况下，并网逆变器的控制装置能够保证输出电流的平均值不大于逆变器额定电流的平均值。在对称和不对称故障情况下，输出功率中均不包含二次震荡分量。

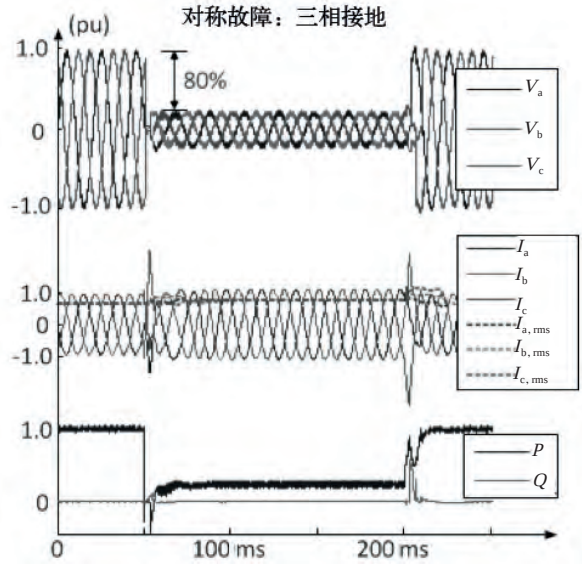


图8　电力系统结构与戴维南等效电路模型

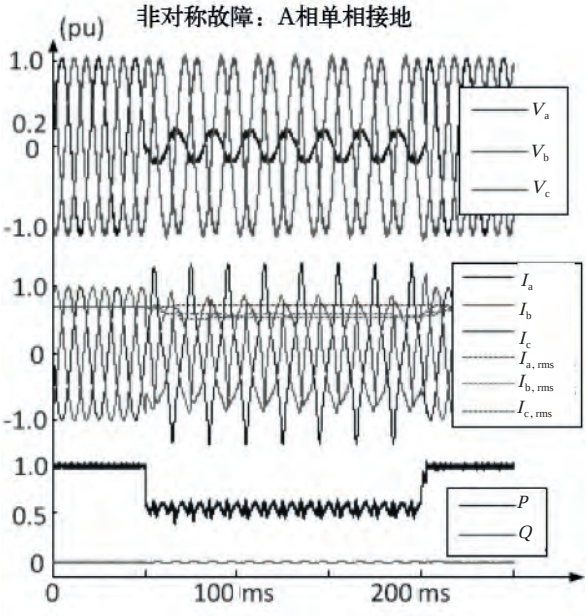


图9　电力系统结构与戴维南等效电路模型

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2 实验结果

实验系统如图10所示，包含3个主要装置、模拟电网装置、并网逆变器装置和并网逆变器的控制装置。模拟电网装置为1个三相的电压型逆变系统，特别定制来测试并联逆变装置。它能够产生可变频率和可变幅值的三相电压，因此可以用来模拟电网故障情况。并网逆变器的控制装置是一种基于DSP的可编程数字控制装置。

图11、图12分别给出了在对称和不对称故障情况下，并网逆变器的三相输出电流。如图所示，在本文提出的低电压穿越控制策略下，并网逆变器的输出电流始终不高于额定电流，并且能够保证平滑的输出功率，因此并网逆变器能够实现低电压穿越。

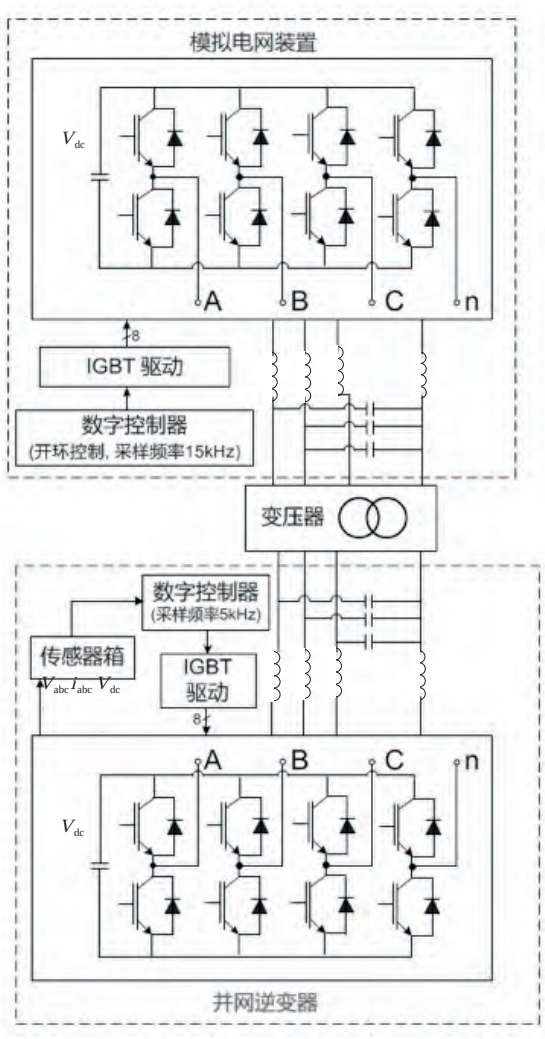


图10 电力系统结构与戴维南等效电路模型

4 结束语

本文针对微电网并网逆变器提出了一种新型的控制策略，能够在微电网对主网注入功率同时主网出现对称或不对称故障的情况下，实现微电网低电压穿越功能。仿真和实验结果均表明本文提出的微电网并网逆变装置及其控制策略能够有效地帮助微电网在主网出现对称和非对称故障时实现低电压穿越。在主网出现故障同时微电网向主网注入大量有功功率时，微电网并网装置与控制策略能够保证微电网实现故障穿越，从而避免主网因损失大量有功功率失去稳定。

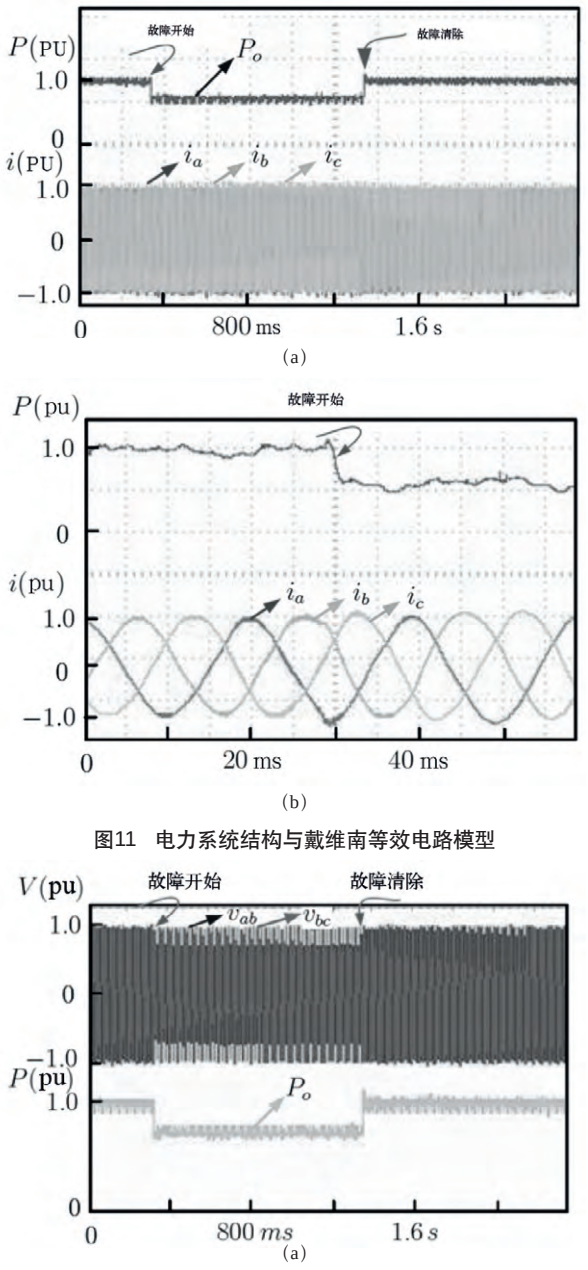
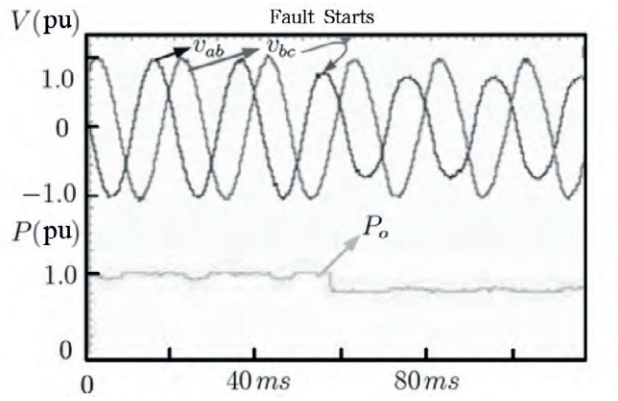
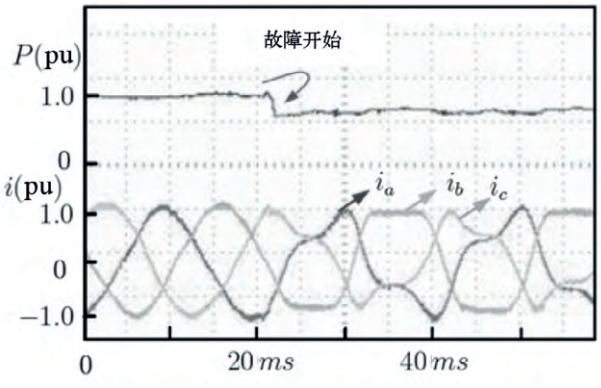


图11 电力系统结构与戴维南等效电路模型

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(b)



(c)

图12 电力系统结构与戴维南等效电路模型

参考文献

[1] 黄文焘，邰能灵，范春菊，等，微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制，2012, 40（18）：149-155.

[2] 苏玲，张建华，王利，等，微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制，2010, 38（19）：235-239.

[3] 刘文，杨慧霞，祝斌，微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制，2012, 40（14）：153-155.

[4] Yu X，Khambadkone A. Combined active and reactive power control of power converter building block to facilitate the connection of micro-grid to electric power system[J]. Proc. IEEE ECCE，2009（9）. 3161 –3168.

[5] Blaabjerg F，Teodorescu R，Liserre M，etal. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron.，2006，53（10）：1398–1409.

[6] Rodriguez P，Timbus A，Teodorescu R，et al “Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Trans on Ind Electron. 2007，54（10）：2583–2592.

[7] Castilla M，Miret J，Sosa J，et al. Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics[J]. IEEE Trans on Power Electron，2010，25（11）：2930–2940.

[8] Akagi H，Watanabe E. H，Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning[J]. IEEE Press，2007（3）.

[9] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京：中国电力出版社，2010.

[10] 朱星阳，张建华，刘文霞，等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报，2013, 28（5）：88-98.

[11] 章玮，王宏胜，任远，等. 不对称电网电压条件下三相并网型逆变器的控制[J]. 电工技术学报，2010, 25（12）：103-110.

[12] 王毅，付媛，苏小晴，等. 基于VSC-HVDC联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报，2013, 28（12）：150-159.

（收稿日期：2015－05－26）EA

作者简介

余潇潇（1986-），女，博士，工程师，主要从事电网规划，分布式电源并网，及微电网设计与控制。

张凯（1969-），男，硕士，高级工程师，北京电力经济技术研究院副院长，长期从事电网规划管理。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net