

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180900

# 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的 低电压穿越控制

王书征, 李先允, 许峰

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 级联型并网逆变器在大容量光伏并网中具有较好的应用前景, 有利于解决光伏阵列间的光照不均匀造成的发电效率低的问题。研究了在不对称电网故障条件下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制策略。首先分析了在不对称电网故障条件下网侧电压的数学模型, 总结出不同故障条件下三相网侧电压幅值与相位之间的规律。基于上述规律分析了不同故障条件下级联型光伏并网逆变器的控制方法, 并提出了基于旁路原理的低电压穿越控制策略。最后建立了级联型光伏并网逆变器低电压穿越控制策略的仿真模型。通过算例仿真, 验证了控制策略设计的正确性和有效性。

**关键词:** 光伏并网系统; 级联型 H 桥; 不对称故障; 低电压穿越; 旁路策略

## Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault

WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** Cascaded grid-connected inverter has good application prospects in large-capacity grid-connected photovoltaic systems, which helps to solve the problem of lower generation efficiency caused by unequal irradiance between PV arrays. The Low Voltage Ride Through (LVRT) control strategy of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault conditions is studied. First, the mathematical model of voltages in grid side is researched under asymmetric grid fault conditions. The law of amplitude and phase of three phase voltages in grid side is summarized under different fault conditions. The control method of cascaded inverter for grid-connected PV systems is analyzed based on the above law, and the low voltage through control strategy based on bypass principle is proposed. Finally, the simulation model of the low voltage through control strategy of cascaded inverter for grid-connected PV systems is established. The correctness and effectiveness of control strategy design are verified by simulation under fault conditions.

This work is supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Universities (No. 16KJB470006).

**Key words:** photovoltaic grid-connected systems; cascaded H-bridge; asymmetric fault; low voltage ride-through; bypass strategy

## 0 引言

光伏并网发电使太阳能的大规模利用成为可能,

**基金项目:** 江苏省高校自然科学研究面上项目资助(16KJB470006); 江苏省重点研发计划项目资助(BE2018130); 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目资助(XTCX201905); 南京工程学院创新基金项目资助(CKJ2011003)

近年来, 光伏发电技术在我国发展迅猛, 装机容量大幅上升, 光伏并网发电接入电网的比例越来越大, 光伏并网发电系统与电力系统之间的相互影响不容忽视<sup>[1]</sup>。当电网发生故障造成并网点电压跌落时, 一旦光伏电站发生大范围的脱网, 就可能造成电网电压与频率崩溃, 严重影响电网的安全稳定运行和可靠供电, 并遭受较大的经济损失。光伏系统也因光伏电池自身输出功率的随机性和间歇性导致其并

网功率波动较大。因此, 对于大容量光伏并网发电系统, 要求光伏并网系统具备低电压穿越能力<sup>[2]</sup>, 当电网发生故障时, 光伏发电系统应保证并网运行不脱机, 帮助电网从故障中恢复, 维持电网电压与频率的稳定, 以提高其并网发电的电能质量并维护电力系统的稳定运行<sup>[3]</sup>。

光伏电站的低电压穿越控制策略与风电场比较相对简单<sup>[4-6]</sup>, 其主要功能是制约光伏逆变器并网点电流, 防止过流而导致光伏逆变器功率元件损坏或自身保护而跳开, 所以既要保持光伏逆变器不脱网, 又不能损害逆变器。另外, 光伏逆变器允许短时运行在额定电流的 1.1 倍, 并且光伏逆变器应发出无功电流以支撑电网电压恢复。因此光伏电站低电压穿越控制策略主要是从控制光伏逆变器的角度入手, 分析光伏逆变器低电压穿越控制策略。

通过改进控制策略来实现光伏并网系统的低电压穿越无须额外的硬件开销<sup>[7-16]</sup>, 由于光伏电池板的输出特性决定了光伏发电系统不存在大惯性环节, 通过改进控制策略, 优化控制电网故障期间逆变器的输出电流, 可以获得光伏并网系统的低电压穿越能力。比较经典的方法为矢量控制, 矢量控制方法需要对并网点电压与并网电流分别进行正负序分量提取和坐标变换, 控制系统比较复杂。使用超级电容能够短时间内快速充放电, 用于抑制电网故障期间的功率不平衡与电网电流冲击, 而且超级电容有助于提高逆变器输出性能、改善输出电能质量<sup>[17-19]</sup>。因此随着超级电容技术的发展, 采用超级电容的光伏发电系统也越来越多。

在电网中, 不对称故障比对称故障出现的概率更大, 保证并网逆变器在不对称故障条件下的稳定运行非常重要。由于电网电压跌落时, 光伏逆变器可能出现过电压、过电流等暂态过程, 会影响到逆变器本身及其控制系统的运行甚至安全, 因此, 如何抑制逆变器的过电流、稳定直流母线电压、快速恢复故障切除后的功率等一系列问题均需深入研究。

本文通过分析两种常见不对称电网故障条件下网侧电压的数学模型, 总结出三相网侧电压幅值与相位之间的规律, 基于上述规律研究了不同故障条件下级联型光伏并网逆变器的控制方法, 并提出了基于旁路原理的级联型光伏并网逆变器低电压穿越控制策略, 最后建立了级联型光伏并网逆变器低电压穿越控制策略的仿真模型, 通过不同故障条件下的算例进行了仿真, 结果表明所提出的低电压穿越控制策略, 对光伏发电大规模并网后保证电网的安

全稳定运行具有重要意义。

## 1 不对称故障条件下网侧电压数学模型

级联型光伏并网逆变器除了具有输出电压幅值高, 输出谐波小、开关频率低、易于模块化设计等优点<sup>[20]</sup>, 可以无变压器地接入高压电网, 减小了系统的体积和成本, 更关键的是, 在级联型光伏并网逆变器中, 由于每级功率单元对应的光伏阵列中串联光伏模块的数目较少, 当每级功率单元采用独立的 MPPT 控制时, 在光照不均匀和光伏阵列之间不匹配条件下能保证系统的输出功率最大化, 所有这些都利于系统效率的提高, 因此, 级联型逆变器将是光伏并网逆变器的理想拓扑。

图 1 为本文研究的级联型光伏并网逆变器系统结构图, 各相由  $N$  个 H 桥单元级联而成, 三相采用星型连接。图 1 左侧给出了 A 相模块链接的具体结构, 每个模块主要由光伏阵列、隔离级和 H 桥逆变器组成, 每个光伏阵列由一组光伏模块先串后并连接而成, 从而获得直流侧需要的电压和电流。 $v_{pvi}$  为光伏阵列输出电压,  $U_{dci}$  为直流母线电压;  $u_{Ai}$  ( $i=1, \dots, n$ ) 表示第  $i$  级 H 桥逆变器输出电压;  $e_k$  ( $k=a, b, c$ ) 为电网电压;  $i_k$  ( $k=a, b, c$ ) 为网侧电流;  $L_s$  为逆变器并网电感;  $N$  为星型连接级联型逆变器的中性点。

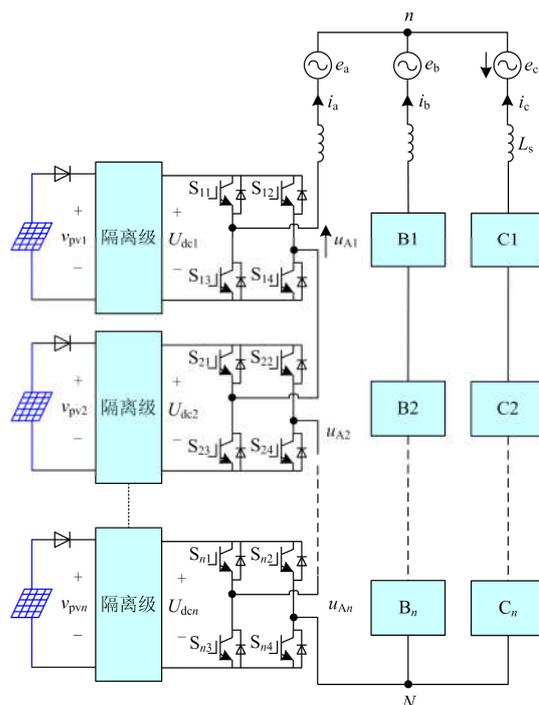


图 1 级联型光伏逆变器并网系统结构

Fig. 1 Cascaded inverter configuration for grid-connected photovoltaic systems

在不对称故障条件下，设网侧系统电压为

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}E_p \sin(\omega t) + \sqrt{2}E_n \sin(\omega t + \theta_n) + \\ \sqrt{2}E_z \sin(\omega t + \theta_z) \\ e_b = \sqrt{2}E_p \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{2}E_n \sin(\omega t + \theta_n + \frac{2}{3}\pi) + \\ \sqrt{2}E_z \sin(\omega t + \theta_z) \\ e_c = \sqrt{2}E_p \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{2}E_n \sin(\omega t + \theta_n - \frac{2}{3}\pi) + \\ \sqrt{2}E_z \sin(\omega t + \theta_z) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $E_p$ 、 $E_n$ 、 $E_z$ 分别为系统电压的正序、负序和零序分量的有效值； $\theta_n$ 、 $\theta_z$ 分别为系统负序电压与零序电压的初始相位。

三相电流为

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t + \varphi_p) \\ i_b = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t + \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) \\ i_c = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t + \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $I_p$ 、 $\varphi_p$ 分别为三相电流的有效值和初始相位。

为了对三相之间的功率平衡控制进行分析，图2给出了两种常见不对称故障时网侧相电压的矢量图，从图中可以得出以下规律。

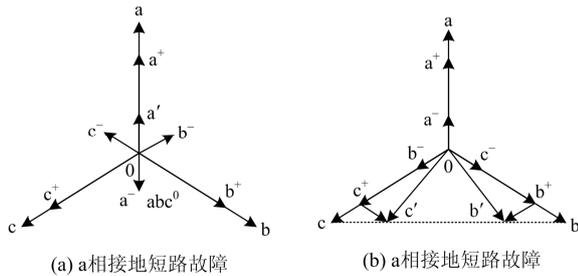


图2 不对称故障时网侧相电压矢量图

Fig. 2 Phasor diagrams of grid phase voltage under asymmetric fault

当 a 相接地短路时：(考核电压为光伏电站并网点相电压  $e_a$ )

①  $e_a$  幅值减小， $e_b$ 、 $e_c$  幅值不变；当  $e_a$  减小为 0 时， $e_{ab}$ 、 $e_{ca}$  幅值减小为相电压幅值；

② 相电压正序分量初相位为  $0^\circ$ ，零序和负序分量初相位均为  $180^\circ$ ，即  $\theta_n = \theta_z = \pi$ ；

③ 零序与负序分量的幅值是电压跌落深度的 1/3。

当 bc 相间短路时：(考核电压为光伏电站并网点线电压  $e_{bc}$ )

①  $e_{bc}$  幅值减小， $e_a$  幅值保持不变， $e_b$ 、 $e_c$  幅值相应减小；当  $e_{bc}$  减小为 0 时， $e_b$ 、 $e_c$  幅值分别减小为原来的 1/2；

② 相电压正序和负序分量初相位均为  $0^\circ$ ，即  $\theta_n = 0$ ，不存在零序分量；

③ 负序分量的幅值是电压跌落深度的 1/2，当  $e_{bc}$  减小为 0 时，负序分量与正序分量幅值相等。

根据上述规律，假设电压跌落深度为  $k$ ，a 相发生接地故障时，网侧系统电压可以表示为

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}(1 - \frac{k}{3})E \sin(\omega t) - \sqrt{2}\frac{k}{3}E \sin(\omega t) - \\ \sqrt{2}\frac{k}{3}E \sin(\omega t) \\ e_b = \sqrt{2}(1 - \frac{k}{3})E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - \sqrt{2}\frac{k}{3}E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - \\ \sqrt{2}\frac{k}{3}E \sin(\omega t) \\ e_c = \sqrt{2}(1 - \frac{k}{3})E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - \sqrt{2}\frac{k}{3}E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - \\ \sqrt{2}\frac{k}{3}E \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

bc 相发生相间故障时，网侧系统电压可以表示为

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}(1 - \frac{k}{2})E \sin(\omega t) + \sqrt{2}\frac{k}{2}E \sin(\omega t) \\ e_b = \sqrt{2}(1 - \frac{k}{2})E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{2}\frac{k}{2}E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ e_c = \sqrt{2}(1 - \frac{k}{2})E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{2}\frac{k}{2}E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (4)$$

有功功率交换是决定直流侧电压平衡的重要因素，为了维持直流侧电压平衡，假设逆变器注入的零序电压瞬时表达式为

$$u_o = \sqrt{2}U_o \sin(\omega t + \theta_o) \quad (5)$$

则以 a 相为例，级联型光伏并网逆变器的单相等效电路如图 3 所示。

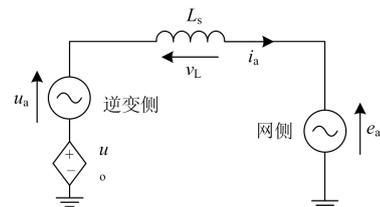


图3 单相级联型并网逆变器交流侧等效电路

Fig. 3 Simplified circuit model of a single phase cascaded grid-connected inverter

结合图 3, 根据式(1)、式(2)可以得到各单相的平均功率表达式为

$$\begin{cases} P_a = E_p I_p \cos \varphi_p + E_n I_p \cos(\theta_n - \varphi_p) + \\ E_z I_p \cos(\theta_z - \varphi_p) - U_o I_p \cos(\theta_o - \varphi_p) \\ P_b = E_p I_p \cos \varphi_p + E_n I_p \cos(\theta_n - \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) + \\ E_z I_p \cos(\theta_z - \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) - U_o I_p \cos(\theta_o - \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) \\ P_c = E_p I_p \cos \varphi_p + E_n I_p \cos(\theta_n - \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) + \\ E_z I_p \cos(\theta_z - \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) - U_o I_p \cos(\theta_o - \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (6)$$

首先, 假设所有功率单元均运行在最大功率跟踪状态, 每个功率单元发出的功率均为  $P$ ,  $P_{\text{con}}$  为逆变器输出功率,  $P_g$  为流入电网功率, 正常运行时, 考虑功率因数为 1, 则额定正常运行时,

$$\begin{cases} P_{\text{con}} = P_{ca} + P_{cb} + P_{cc} = 3nP \\ P_g = 3EI \end{cases} \quad (7)$$

忽略变流器和线路损耗, 由  $P_g = P_{\text{con}}$ , 可得

$$I = \frac{nP}{E} \quad (8)$$

当 a 相发生接地故障时, 可推出

$$P_g = (1-k)EI_p \cos \varphi_p + EI_p \cos \varphi_p + EI_p \cos \varphi_p = (3-k)EI_p \cos \varphi_p \quad (9)$$

由  $P_g = P_{\text{con}}$ , 可得

$$I_p = \frac{3}{3-k} \cdot \frac{nP}{E \cos \varphi_p} = \frac{3}{3-k} \cdot \frac{I}{\cos \varphi_p} \quad (10)$$

同理, 当 bc 相间短路故障时, 可推出

$$I_p = \frac{2}{2-k} \cdot \frac{nP}{E \cos \varphi_p} = \frac{2}{2-k} \cdot \frac{I}{\cos \varphi_p} \quad (11)$$

由上可知, 当网侧发生不对称故障时,  $I_p$  的幅值随着电压跌落深度  $k$  和电流相位  $\varphi_p$  的增大而增大, 并且在相同的电压跌落深度下, bc 相间故障时  $I_p$  幅值增加较大, 逆变器输出更容易过流。因此下面提出了在不同故障下旁路不同功率单元的方法来保证逆变器不过流, 并使输出功率最大化, 为了简化起见, 在下面分析中令  $\varphi_p = 0$ 。

## 2 不同故障条件下的控制方法分析

为了保证在电网故障情况下逆变器不过流, 假设逆变器三相旁路的单元数目分别为  $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ , 在旁路条件下, 逆变器输出功率可表示为

$$P_{\text{con}} = [3n - (n_a + n_b + n_c)]P = (3-k)EI_p \quad (12)$$

令  $t_p = \frac{I_p}{I}$  为过流倍数, 则

$$\frac{n_a + n_b + n_c}{n} = 3 - t_p(3-k) \quad (13)$$

从上式可以看出, 电压跌落深度  $k$  越大, 需要旁路的单元数越多。

由于 a 相发生单相接地故障时, 网侧系统电压中同时含有零序和负序分量, 因此, 采用零序电压注入法和负序电压注入法时, 逆变器输出的功率分别为

$$\begin{cases} P_a = (n - n_a)P = (1-k)EI_p - U_o I_p \cos \theta_o \\ P_b = (n - n_b)P = EI_p - U_o I_p \cos(\theta_o + \frac{2}{3}\pi) \\ P_c = (n - n_c)P = EI_p - U_o I_p \cos(\theta_o - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_a = (n - n_a)P = (1-k)EI_p - U_n I_p \cos \theta_n \\ P_b = (n - n_b)P = EI_p - U_n I_p \cos(\theta_n - \frac{2}{3}\pi) \\ P_c = (n - n_c)P = EI_p - U_n I_p \cos(\theta_n + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (15)$$

由以上两式可以看出, 采用不同方法时逆变器 b 相和 c 相输出功率具有对称性, 因此在 a 相发生单相接地故障时, 两种电压注入法效果一样, 为了简便起见, 本文使用零序电压注入法。

下面推导具体旁路单元的数目, 其旁路目标为:

1) 保证调制比小于 1; 2) 使三相调制比尽量保持一致。

在式(14)中由  $kEI_p = k \frac{I_p}{I} EI = kt_p nP$ , 可把式(14)

等效成下面网侧电压无故障时的功率方程,

$$\begin{cases} EI_p - U_o I_p \cos \theta_o = (n - n_a + kt_p n)P \\ EI_p - U_o I_p \cos(\theta_o + \frac{2}{3}\pi) = (n - n_b)P \\ EI_p - U_o I_p \cos(\theta_o - \frac{2}{3}\pi) = (n - n_c)P \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16), 可推出

$$\begin{cases} U_o \sin \theta_o = \frac{n_c - n_b}{\sqrt{3}t_p n} E \\ U_o \cos \theta_o = [\frac{2n - (n_b + n_c)}{nt_p} - 2]E = (1-k)E - \frac{n - n_a}{nt_p} E \end{cases} \quad (17)$$

下面推导 a 相发生单相接地故障时, 注入零序电压时产生的逆变器交流电压大小:

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2}(1-k)E \sin \omega t + \omega L \cdot \sqrt{2}I_p \cos(\omega t) - \\ \quad \sqrt{2}U_o \sin(\omega t + \theta_o) \\ u_b = \sqrt{2}E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \omega L \cdot \sqrt{2}I_p \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - \\ \quad \sqrt{2}U_o \sin(\omega t + \theta_o) \\ u_c = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + \omega L \cdot \sqrt{2}I_p \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - \\ \quad \sqrt{2}U_o \sin(\omega t + \theta_o) \end{cases} \quad (18)$$

把式(17)代入式(18), 并化简可得

$$\begin{cases} |u_a| = \sqrt{\left(\frac{n-n_a}{m_t p}\right)^2 + \left(\frac{t_p}{10} - \frac{n_c-n_b}{\sqrt{3}t_p n}\right)^2} \cdot \sqrt{2}E \\ |u_b| = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{3}\left(\frac{t_p}{10} + \sqrt{3}\right)}{2} - \frac{2n-(n_b+n_c)}{m_t p}\right]^2 + \left(\frac{t_p}{10} + \sqrt{3}\right)^2 + \frac{n_c-n_b}{\sqrt{3}t_p n}} \cdot \sqrt{2}E \\ |u_c| = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{3}\left(\sqrt{3} - \frac{t_p}{10}\right)}{2} - \frac{2n-(n_b+n_c)}{m_t p}\right]^2 + \left(\sqrt{3} - \frac{t_p}{10} - \frac{n_c-n_b}{\sqrt{3}t_p n}\right)^2} \cdot \sqrt{2}E \end{cases} \quad (19)$$

令  $|u_x| = k_x m(n-n_x)U_{dc}$ ,  $|m_x| = k_x m(x=a, b, c)$ , 则

$$|m_x| = k_x m = \frac{|u_x|}{(n-n_x)U_{dc}} = \frac{|u_x|n}{\sqrt{2}E(n-n_x)} m \quad (20)$$

根据旁路目标 2), 当  $n_b = n_c = 0$  时,  $\Delta m_{bc}^2 = (m_b)^2 - (m_c)^2$  与  $\Delta m_{ba}^2 = (m_b)^2 - (m_a)^2$  分别取得最小值。

由于  $n_b = n_c = 0$  时,  $m_b$  和  $m_c$  均为  $t_p$  的减函数, 所以当  $t_p = 1$  时,  $m_b$  和  $m_c$  取得最大值  $m$ , 同理由于

$$m_a = \sqrt{\left(\frac{1}{t_p}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{3-k-\frac{2}{t_p}}\right)^2} \cdot m \quad (21)$$

可以看出,  $m_a$  为  $t_p$  的减函数、 $k$  的增函数, 所以当  $t_p = 1$ ,  $k=0$  时,  $m_a$  也取得最大值  $m$ 。从而在电网发生单相接地故障时, 通过旁路故障相功率单元可以保证三相调制比均不大于 1, 且三相调制比基本一致。下面推导具体的旁路单元数, 由于  $n_b = n_c = 0$ , 所以

$$\begin{cases} P_a = (n-n_a)P = (1-k)EI_p - U_o I_p \cos \theta_o \\ P_b = nP = EI_p - U_o I_p \cos(\theta_o + \frac{2}{3}\pi) \\ P_c = nP = EI_p - U_o I_p \cos(\theta_o - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (22)$$

由式(17)和式(22), 可推出

$$\begin{cases} U_o = 2\left(1 - \frac{1}{t_p}\right) \cdot E \\ \theta_o = \pi \end{cases} \quad (23)$$

结合式(22)和式(23), 可推出

$$n_a = [3 - t_p(3-k)]n \quad (24)$$

用“ $\lceil x \rceil$ ”表示对实数  $x$  向上取整, 则  $n_a$  可表示为

$$n_a = \lceil (1.1k - 0.3)n \rceil \quad (25)$$

在上述条件下, 当  $n \geq 5$  时, 可以保证  $1 \leq t_p \leq 1.1$ 。

同理, 当 bc 相发生相间短路故障时, 可推导出

$$n_a + n_b + n_c = \lceil (1.65k - 0.3)n \rceil \quad (26)$$

假设  $n_a + n_b + n_c$  按照 3 的倍数分类,  $j$  为非负整数, 则旁路单元数可以总结为下面规律:

当  $n_a + n_b + n_c = 3j$ ,  $n_a = n_b = n_c = j$ ;

当  $n_a + n_b + n_c = 3j+1$  时,  $n_a = j+1$ ,  $n_b = n_c = j$ ;

当  $n_a + n_b + n_c = 3j+2$  时,  $n_a = j$ ,  $n_b = n_c = j+1$ 。

并且在上述条件下, 当  $n \geq 5$  时, 可以保证  $1 < t_p \leq 1.1$ 。

并满足

$$\begin{cases} |n_b - n_c| = 0 \\ |n_b - n_a| \leq 1 \end{cases} \quad (27)$$

### 3 不对称故障下低电压穿越控制策略

当网侧电压出现故障时, 为了保证逆变器不过流, 本文采用旁路部分功率单元的方法。旁路控制策略不仅可以保证级联型光伏并网逆变器继续运行, 并且使继续运行的功率单元维持在最大功率跟踪状态。在图 1 所示的级联型光伏并网逆变器系统中, 当检测到网侧电压出现故障时, 为了维持系统的正常运行, 根据故障类型和电压跌落深度, 通过短路功率单元交流输出端来旁路相应数目的功率单元, 降低逆变器输出的功率, 从而保证系统继续运行。其控制目标是: 1) 当网侧电压发生故障时, 保持逆变器不脱网运行, 并保证三相电流对称和单位功率因数输入; 2) 保证运行的功率单元达到最大功率跟踪状态; 3) 保证各功率单元直流侧电压平衡。

级联型光伏并网逆变器的整体控制系统如图 4 所示, 整体直流侧电压及电流解耦控制模块输出的各相链节电压指令值  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  和网侧故障控制输出的指令电压  $u_o$  (或  $u_{an}$ 、 $u_{bn}$ 、 $u_{cn}$ ) 共同构成了各相链节的输出电压指令值  $u_a^*$ 、 $u_b^*$ 、 $u_c^*$ 。

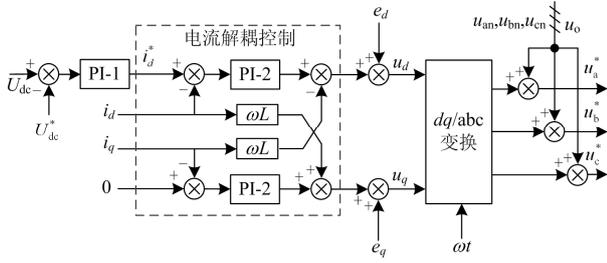


图 4 整体直流电压及电流解耦控制

Fig. 4 Total DC-voltage and decoupling current control

网侧故障控制模块主要是根据网侧电压故障类型与电压跌落深度来注入相应的零序电压  $u_0$  或负序电压 ( $u_{an}$ 、 $u_{bn}$ 、 $u_{cn}$ )，具体见图 5 所示的控制框图。由于相间功率平衡控制所注入零序电压的调节时间较长，故此模块可以在旁路功率单元时进行指令电压的快速调节，达到旁路动作后继续运行单元的直流侧电压不突变的效果，可以大大增强装置的可靠性。

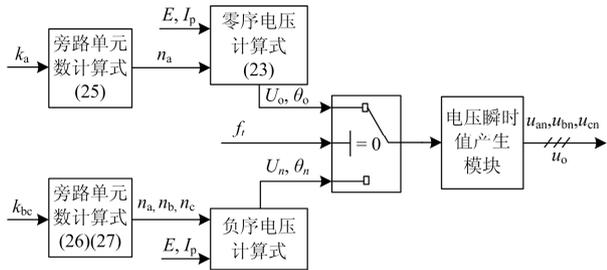


图 5 网侧故障时电压控制框图

Fig. 5 Configuration of the proposed fault control system

在图 5 所示的控制策略中， $k_a$  表示发生单相接地短路故障时网侧电压跌落深度， $k_{bc}$  表示发生相间短路故障时网侧电压跌落深度。首先判断网侧电压故障类型  $f_i$ ，当  $f_i = 0$  时，代表发生单相接地短路故障，当  $f_i = 1$  时，代表发生相间短路故障。然后根据网侧电压跌落深度分别计算出需要旁路的单元数 ( $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ )，并根据  $n_a$ 、 $E$  和  $I_p$  计算出需要注入的零序电压和负序电压，最后产生相应的电压瞬时值。

### 4 仿真结果与分析

为了验证提出的低电压穿越控制策略的有效性和正确性，在 PSCAD/ EMTDC 软件上建立了如图 1 所示的级联型光伏并网逆变器及其控制策略的仿真模型，仿真系统主电路参数如表 1 所示。

本文针对常见的单相接地短路故障展开了详细的仿真研究，仿真中假设每个功率单元中的光伏阵列光照强度和电池温度保持一致，即相内功率单元之间功率基本平衡。

表 1 级联型光伏并网逆变器系统主电路参数

Table 1 Main parameters of cascaded inverter configuration for grid-connected photovoltaic systems

参数	数值	参数	数值
系统额定电压 $E_{ab}/V$	3 000	光伏阵列输出侧直流电	4 000
系统额定频率 $f_s/Hz$	50	容 $C_p/\mu F$	
装置额定功率		开关频率 $f_c/Hz$	2 000
$P_s/kW$	600	中间直流母线电压 $U_{dc}/V$	800
并网电感 $L_s/mH$	3	中间直流母线电容 $C_k/\mu F$	10 000
H 桥级联单元数 $N$	5		

根据光伏并网国家最新标准 GB/T 19964《光伏发电站接入电力系统技术规定》中对低电压穿越技术的要求，PCC 点电压跌落至额定值的 0%时，光伏逆变器应能不脱网持续运行 0.15 s，即能够实现零电压穿越。因此本算例设置故障如下：PCC 点 A 相电压在 0.6 s 时发生单相接地故障，A 相电压跌落至额定值的 0%，到 0.75 s 时切除故障。故障期间仿真波形如图 6 和图 7 所示。其中：图 6 给出了故障期

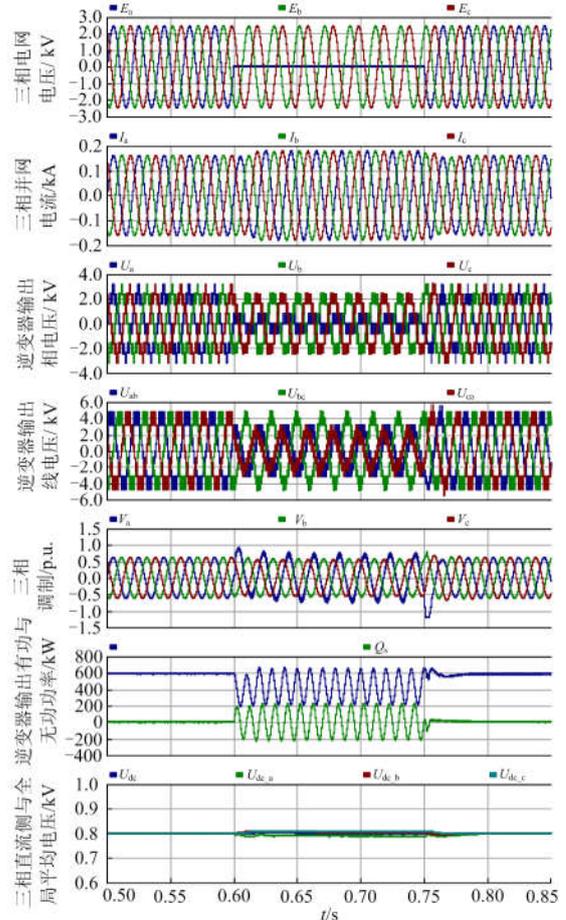


图 6 并网点电压跌落至 0%时的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms when the grid-connected voltage drops to 0%

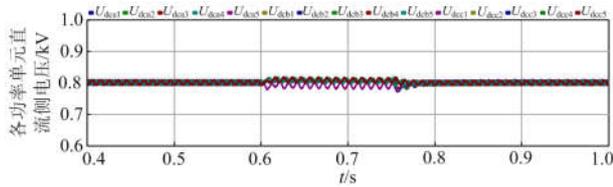


图 7 每个单元的中间直流母线电压

Fig. 7 DC-link voltage of each power cell

间三相电网相电压和相电流、逆变器输出相电压和线电压、逆变器三相调制波、逆变器输出有功与无功功率、三相直流侧与全局平均电压等波形；图 7 为各个功率单元的中间直流母线电压波形。

从图 6 中可以看出，在 0.6 s，PCC 点 A 相电压跌落至 0% 时，逆变器 A 相输出调制波增大，B、C 相输出调制波减小；逆变器输出相电压输出电平减小，其中  $U_a$  减小较多， $U_b$ 、 $U_c$  减小较少；而线电压  $U_{bc}$  输出电平不变，线电压  $U_{ab}$ 、 $U_{ca}$  输出电平相应减小，级联型光伏并网逆变器的输出电流恰好增大到额定电流的 1.1 倍，并保持三相对称，且与网侧电压同相位，符合并网要求，较好地实现了零电压穿越的要求。

故障期间逆变器输出有功功率维持在 440 kW 左右，无功功率维持在 0 kvar 左右，保证了逆变器的有功功率平衡，维持了直流母线电压的稳定。在发生故障及故障被清除时，并网电流与有功功率不存在任何冲击。但由于故障期间网侧负序电压达到最大值，逆变器输出的有功功率和无功功率都存在更大的二倍频波动，但能够保持系统的稳定。另外由于故障期间逆变器输出功率减小到 440 kW，说明当 PCC 点 A 相电压跌落至额定值的 0% 时，逆变器旁路了 4 个功率单元，与式(25)计算的旁路单元数目一致，这是单相电压跌落至 0% 时满足零电压穿越技术要求需要旁路的最少功率单元数，实现了逆变器输出功率的最大化。

另外从图 6 和图 7 中还可以看出，在单相电压跌落至 0% 时，由于采用了网侧故障时零序电压注入控制，使级联型光伏并网逆变器各直流侧输入最大功率与输出侧保持平衡，三相直流侧与全局平均电压大小相同，并能够保证每个功率单元的直流侧电压基本一致，维持了直流侧系统的稳定。

## 5 结论

本文分析了光伏电站低电压穿越的必要性，然后分析和研究了两种常见不对称电网故障情况下网侧电压的数学模型，总结出三相网侧电压幅值与相位之间的规律，基于上述规律提出了基于旁路原

理的级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制方法。该控制策略可保证光伏并网逆变器在网侧电压故障期间输出对称的三相电流，实现光伏并网逆变器单位功率因数运行。最后在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中建立了级联型光伏并网逆变器及其低电压穿越控制策略的仿真模型，通过对电压跌落至 0 的算例进行了仿真研究，充分验证了上述控制策略设计的正确性和有效性，并说明了所提出的低电压穿越控制策略，对光伏发电大规模并网后保证电网的安全稳定运行具有重要意义。

## 参考文献

- [1] VIET N H, YOKOYAMA A. Impact of fault ride-through characteristics of high-penetration photovoltaic generation on transient stability[C] // International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China: 1-7.
- [2] LEE C T, HSU C W, CHENG P T. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1821-1832.
- [3] BAE Y, VU T K, KIM R Y. Implemental control strategy for grid stabilization of grid-connected PV system based on German grid code in symmetrical low-to-medium voltage network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 619-631.
- [4] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.  
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Comprehensive control strategy for improving low voltage ride through capability of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 62-67.
- [5] 周士琼, 王倩, 吕潇, 等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 33-39.  
ZHOU Shiqiong, WANG Qian, LÜ Xiao, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator with the stator Crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [6] TAO Renfeng, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Research on the protection coordination of permanent magnet synchronous generator based wind farms with low voltage ride through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 311-319. DOI: 10.1186/s41601-017-0050-4.

- [7] 袁晓玲, 宋鹏飞, 范发靖, 等. 光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力电子技术, 2013, 47(3): 67-69.  
YUAN Xiaoling, SONG Pengfei, FAN Fajing, et al. Low voltage ride through control strategy for PV inverter[J]. Power Electronics, 2013, 47(3): 67-69.
- [8] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.  
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [9] 周京华, 刘劲东, 陈亚爱, 等. 大功率光伏逆变器的低电压穿越控制[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1799-1807.  
ZHOU Jinghua, LIU Jindong, CHEN Ya'ai, et al. Low voltage ride-through control of high power inverter for grid-connection of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1799-1807.
- [10] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.  
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [11] 茹心芹, 王俊辉. 光伏并网逆变器 SVPWM 双滞环低电压穿越控制[J]. 电力电子技术, 2012, 46(11): 20-22.  
RU Xinqin, WANG Junhui. Low voltage ride through for photovoltaic grid-connected converter SVPWM based on the double hysteresis loop current control[J]. Power Electronics, 2012, 46(11): 20-22.
- [12] 王南, 陈艺峰, 吴恒亮. 光伏并网逆变器低电压穿越技术研究[J]. 大功率变流技术, 2013(1): 38-42.  
WANG Nan, CHEN Yifeng, WU Hengliang. Research on the technology of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic inverter[J]. High Power Converter Technology, 2013(1): 38-42.
- [13] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.  
CHEN Bo, ZHU Xiaodong, ZHU Lingzhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.
- [14] 郑飞, 张军军, 丁明昌. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 41(2): 19-24.  
ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Low voltage ride-through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 41(2): 19-24.
- [15] LEE C T, HSU C W, CHENG P T. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1821-1832.
- [16] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.  
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.
- [17] 刘耀远, 曾成碧, 李庭敏, 等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 77-82.  
LIU Yaoyuan, ZENG Chengbi, LI Tingmin, et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 77-82.
- [18] TIAN H, GAO F, MA C. Novel low voltage ride through strategy of single-stage grid-tied photovoltaic inverter with supercapacitor coupled[C] // 2012 7th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, June 2-5, 2012, Harbin, China: 1188-1192.
- [19] TIAN H, GAO F, MA C. Advanced performance control of two-stage grid-tied photovoltaic inverter with fast energy storage component[C] // 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, June 25-28, 2012, Aalborg, Denmark: 403-409.
- [20] WANG Shuzheng, ZHAO Jianfeng, SHI Chao. Research on a three-phase cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems[C] // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, October 16-20, 2011, Beijing, China: 543-548.

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-10-09  
作者简介:

王书征(1983—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为光伏发电与并网技术。E-mail: wsz310@126.com

(编辑 葛艳娜)