

计及锁相环暂态过程的正负双序控制光伏短路电流计算方法

李世伟¹, 毕书奇^{2,3}, 许守东⁴, 欧阳金鑫^{2,3}, 龚辉¹, 石恒初⁵, 张丽⁴

(1. 云南电网有限责任公司红河供电局, 云南 蒙自 661100; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044; 4. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 5. 云南电力调度控制中心, 昆明 650000)

摘要: 随着光伏发电装机的持续增加, 光伏故障输出特性的准确分析与计算成为电力系统安全运行的关键。逆变器的控制直接影响光伏发电系统的故障行为。当电网发生不对称短路故障时, 现有光伏短路电流计算方法未考虑锁相环暂态过程, 忽略了锁相偏差对短路电流的影响, 可能产生较大误差。为此, 分析了电网故障下光伏正负双序控制暂态响应, 推导了正负序交直流电流的表达式, 分析了电流的跟踪特性, 进一步提出了电网不对称故障下锁相偏差的计算方法, 分析了正负双序控制过程中锁相偏差对光伏短路电流的影响, 推导了正负序旋转坐标系下的光伏正负序电流表达式, 从而得出了光伏短路电流的计算方法, 并通过仿真分析验证了所提出的光伏短路电流计算方法的正确性。

关键词: 光伏发电; 短路电流; 锁相环; 故障分析

Calculation Method of Positive and Negative Sequence Controlled Photovoltaic Short-Circuit Current Considering Phase-Locked Loop Transient Process

LI Shiwei¹, BI Shuqi^{2,3}, XU Shoudong⁴, OUYANG Jinxin^{2,3}, GONG Hui¹, SHI Hengchu⁵, ZHANG Li⁴

(1. Honghe Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Mengzi, Yunnan 661100, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing 400044, China; 4. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 5. Yunnan Electric Power Dispatching Control Center, Kunming 650000, China)

Abstract: With the continuous increase of photovoltaic power generation installed capacity, accurate analysis and calculation of photovoltaic fault output characteristics have become the key to the safe operation of power systems. The control of inverters directly affects the fault behavior of photovoltaic power generation systems. When an asymmetric short-circuit fault occurs in the power grid, the existing photovoltaic short-circuit current calculation methods do not consider the transient process of the phase-locked loop and ignore the impact of phase-locked deviation on the short-circuit current, which may result in significant errors. To this end, the transient response of photovoltaic positive and negative sequence control under power grid faults is analyzed, the expression of positive and negative sequence AC and DC axis currents is derived, the tracking characteristics of currents are analyzed, and a calculation method for phase locking deviation under asymmetric power grid faults is further proposed. The influence of phase locking deviation on photovoltaic short-circuit current in the positive and negative sequence control process is analyzed, and the expression of photovoltaic positive and negative sequence current in the positive and negative sequence rotating coordinate system is derived. The calculation method of photovoltaic short-circuit current is obtained, and the correctness of the proposed photovoltaic short-circuit current calculation method is verified through simulation analysis.

Key words: photovoltaic power generation; short-circuit current; phase-locked loop; fault analysis

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51877018), 云南电网有限责任公司科技项目计划(YNKJXM202 20177)。

Foundation item: Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51877018); the Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd. (YNKJX M20220177)。

0 引言

随着全球能源的需求大幅增加,人类社会面临能源紧缺和环境污染的双重问题。为实现能源生产和消费转型,需逐步提高可再生能源比例,构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系^[1-2]。电能是连接一次能源和终端能源的重要纽带^[3],新能源发电的发展是带动电力系统转型,加快构建新型能源体系的强大动力。光伏发电以其可再生、灵活性和广泛可用性等独特优势,成为新能源发电领域的重要组成部分。然而,光伏阵列通过光伏逆变器并网,电力电子装置与电网间的深度耦合使得光伏发电系统运行控制的复杂程度大幅提升,给电力系统分析和保护带来新的问题^[4-5]。

在光伏发电系统中,逆变器控制对其故障行为产生重要影响^[6-7]。不同运行工况下,逆变器输出电流与机端电压之间的非线性关系导致光伏等效阻抗存在不确定性^[8]。学者们进行了关于光伏发电系统故障特性的研究,如将故障时的分布式电源等效为压控电流源^[9]、构建不同的等效序网络^[10-11]、联立故障复合序网计算故障电流^[12]、分析配电网(distributed power grid, DG)故障稳态特性^[13]、建立 DG 故障模型^[14]以及计算逆变器三相瞬时电流^[15]。然而,现有光伏发电系统故障分析通常假设系统在故障后迅速进入稳态,对于故障初始阶段的暂态过程考虑较少。锁相环(phase locked loop, PLL)在光伏并网运行中扮演关键角色,但在电网发生故障时,锁相环可能出现暂态变化,导致锁相偏差产生,从而影响光伏逆变器控制的准确性^[16]。虽然有学者研究了锁相暂态过程,如电磁暂态过程中 PLL 输出特性^[16]、电磁和机电暂态角度分析 PLL 输出相位差的产生原理^[17]、引入静态锁相偏差计算逆变器输出电流^[18]以及对称故障下的光伏短路电流计算方法^[19],但这些研究大多仅针对电网对称短路情况,对于电网不对称故障下的光伏短路电流缺乏准确计算方法。

本文充分考虑锁相偏差的影响,研究了正负双序控制下光伏短路电流的计算方法。首先,分析了光伏正负双序控制原理,推导了计及电流内环控制过程的正负序交直流电流表达式,分析了电流跟踪特性;其次,根据同步旋转坐标系 PLL 结构,提出了 PLL 输出电压相位与光伏接入点电压相位之间锁

相偏差的计算方法;然后,考虑了正负双序控制过程中坐标变换时锁相偏差对光伏短路电流的影响,推导了正负序旋转坐标系下的光伏正负序电流表达式,从而提出了光伏短路电流的计算方法;最后,通过仿真验证了光伏短路电流计算方法的正确性。

1 光伏暂态控制响应特性

光伏发电系统的拓扑结构如图 1 所示^[20],主要包括光伏电池串并联组合的光伏阵列模块、电力电子器件组成的 DC/AC 光伏逆变器以及滤波回路。光伏逆变器是光伏发电系统的核心部件,用于实现光伏阵列输出的直流电向交流电的转换。图 1 中, e_{abc} 为光伏逆变器交流侧三相电压; i_{abc} 为光伏输出电流; u_{abc} 为光伏并网点(PCC)三相电压; C 为直流侧电容; L 和 R 分别为滤波回路的电感和电阻。

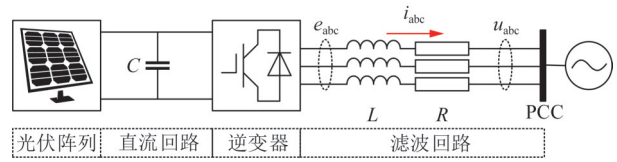


图 1 光伏发电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of photovoltaic power generation system

根据基尔霍夫定律,利用 Park 坐标变换,可得同步旋转坐标系下的光伏逆变器交流侧电压 dq 轴分量为:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega_g Li_q + u_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega_g Li_d + u_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: e_d 、 e_q 和 u_d 、 u_q 分别为光伏逆变器交流侧电压和 PCC 点电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为光伏输出电流的 d 、 q 轴分量; $\omega_g = 2\pi f_g$ 为同步角速度, f_g 为工频。

光伏逆变器通常采用电压外环和电流内环的双闭环矢量控制,如图 2 所示^[4]。其中, U_{dc} 、 U_{dc}^* 、 Q 、 Q^* 分别为光伏逆变器直流电压和输出无功功率的实际值和参考值; i_d^* 、 i_q^* 分别为有功功率和无功功率的参考值; θ_{pll} 为 PLL 输出相角。当电网发生不对称故障时,光伏 PCC 点会产生负序和零序分量^[11],导致光伏输出功率产生 2 倍频振荡^[21-22]。

由于光伏逆变器直流侧通常配置稳压电容,故障期间直流电压的变化较小,因此在电网故障期间

有 2 倍频分量, 使得 PLL 的输出出现较大偏差。采用解耦双同步坐标系单相 PLL 技术, 可以有效消除二倍频分量和直流偏置的影响, 实现相序分离和滤波功能^[25-26]。经相序分离后正负序同步旋转坐标系 PLL 的传递函数为:

$$\frac{\Delta\theta^{(m)}(s)}{\Theta_p^{(m)}(s)} = \frac{s}{s + k_{\text{pll}}(s)U_g^{(m)}} \quad (7)$$

式中: $\Theta_p^{(m)}$ 、 $\Delta\theta^{(m)}$ 分别为 $\theta_p^{(m)}$ 、 $\Delta\theta^{(m)}$ 的拉普拉斯变换形式; $\theta_p^{(m)}$ 、 $\Delta\theta^{(m)}$ 分别为 PCC 电压正负序分量相角和锁相偏差; $k_{\text{pll}}(s) = k_{\text{pll,p}} + k_{\text{pll,i}}/s$ 为 PLL 的 PI 控制器传递函数, $k_{\text{pll,p}}$ 和 $k_{\text{pll,i}}$ 分别为比例系数与积分系数; $U_g^{(m)}$ 为 PCC 正负序电压幅值。

对式(7)求解, 可得故障后正负序电压锁相偏差的时域表达式为:

$$\Delta\theta^{(m)}(t) = \Delta\theta_f^{(m)} e^{-\frac{|k_{\text{pll,i}}U_f^{(m)}|}{2}t} \times \mu(t) \quad (8)$$

式中: $U_f^{(m)}$ 为故障后 PCC 正负序电压幅值; $\Delta\theta_f^{(m)}$ 为相角跳变量; $\mu(t)$ 为锁相偏差振荡系数函数, 与故障程度有关, 表达式为:

$$\mu(t) = \begin{cases} \sqrt{1 + \left[\frac{b^{(m)}}{a^{(m)}}\right]^2} \cos[a^{(m)}t + \gamma^{(m)}], & U_f^{(m)} \leq 4k_{\text{pll,i}}/k_{\text{pll,p}}^2 \\ \sqrt{\left[\frac{b^{(m)}}{a^{(m)}}\right]^2 - 1} \sinh[\sigma^{(m)} - a^{(m)}t], & U_f^{(m)} > 4k_{\text{pll,i}}/k_{\text{pll,p}}^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$a^{(m)} = \sqrt{\left|(k_{\text{pll,p}}U_f^{(m)})^2 - 4k_{\text{pll,i}}U_f^{(m)}\right|}/2,$$

$$b^{(m)} = |k_{\text{pll,p}}U_f^{(m)}|/2,$$

$$\gamma^{(m)} = \arctan(b^{(m)}/a^{(m)}),$$

$$\sigma^{(m)} = \frac{1}{2} \ln[(b^{(m)} + a^{(m)})/(b^{(m)} - a^{(m)})].$$

当 $U_f^{(m)} \leq 4k_{\text{pll,i}}/k_{\text{pll,p}}^2$ 时 $\mu(t)$ 表现为正弦振荡, $U_f^{(m)} > 4k_{\text{pll,i}}/k_{\text{pll,p}}^2$ 时为双曲正弦振荡。以正序为例, 不同 $\Delta\theta_f^{(m)}$ 、 $U_f^{(m)}$ 、 $k_{\text{pll,p}}$ 、 $k_{\text{pll,i}}$ 下正序锁相偏差波形如图 4 所示。

由图 4 和式(8)可知, 当电网发生不对称故障后, 锁相偏差峰值正比于 $\Delta\theta_f^{(m)}$; 衰减速度由 $k_{\text{pll,p}}$ 直接决定, 即 $k_{\text{pll,p}}$ 越大, 锁相偏差衰减越快, PLL 与 PCC 更快实现电压同步; 波形受 $U_f^{(m)}$ 和 $k_{\text{pll,p}}$ 、 $k_{\text{pll,i}}$ 影响, 主要表现为振荡形式的差异。锁相偏差在故障发生时刻达到峰值, 由于振荡过程的存在, 出现超

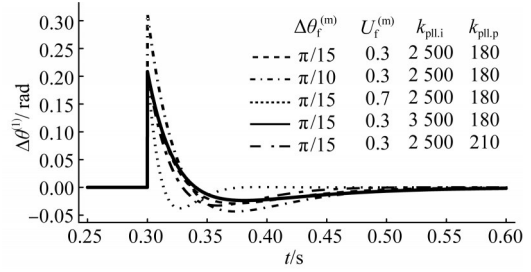


图 4 不同参数下的锁相偏差波形

Fig. 4 Phase-locked loop deviation waveforms under different parameters

调现象, 一段时间后衰减为 0, 实现相位跟踪。

3 光伏不对称短路电流解析

电网发生不对称故障后, 光伏 PCC 处三相电压发生不同程度的幅值跌落和相角跳变, 故障后的 PCC 三相电压相量可写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a^f \\ \dot{U}_b^f \\ \dot{U}_c^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xU_N e^{j(0+\Delta_a)} \\ yU_N e^{j(-\frac{2}{3}\pi+\Delta_b)} \\ zU_N e^{j(\frac{2}{3}\pi+\Delta_c)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\dot{U}_a^f$ 、 $\dot{U}_b^f$ 、 $\dot{U}_c^f$ 分别为故障后 PCC 处 a、b、c 三相电压相量; U_N 为光伏接入线路的电压额定值; x 、 y 、 z 和 Δ_a 、 Δ_b 、 Δ_c 分别表示故障后 PCC 处 a、b、c 三相电压幅值跌落程度和相角跳变量。

采用对称分量法对故障后 PCC 电压分解可得 PCC 处的正负序电压相量为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_f^{(1)} \\ \dot{U}_f^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2}{3}\pi} & e^{j\frac{4}{3}\pi} \\ 1 & e^{j\frac{4}{3}\pi} & e^{j\frac{2}{3}\pi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a^f \\ \dot{U}_b^f \\ \dot{U}_c^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_f^{(1)} e^{j\Delta\theta_f^{(1)}} \\ U_f^{(2)} e^{j\Delta\theta_f^{(2)}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

电网故障前, PCC 三相电压对称, $x=y=z=1$ 且 $\Delta_a=\Delta_b=\Delta_c=0$ 。根据式(10)可得, PCC 电压正序分量幅值为 U_N 相角为 0, 负序分量幅值为 0 相角为 0。电压矢量定向控制下的正负序 d 轴分量将定向于 PCC 正负序电压 a 轴, 即 d 轴与 a 轴夹角为 0, 此时 d 轴和 a 轴重合。当电网发生三相不对称故障时, 根据式(10), PCC 电压正序分量幅值从 U_N 变为 $\dot{U}_f^{(1)}$, 相角从 0 变为 $\Delta\theta_f^{(1)}$; 负序分量幅值从 0 变为 $\dot{U}_f^{(2)}$, 相角从 0 变为 $\Delta\theta_f^{(2)}$ 。正负序 abc 三相坐标系分别发生角度为 $\Delta\theta_f^{(1)}$ 和 $\Delta\theta_f^{(2)}$ 的跳变, 此时正负序分量 d 轴与 PCC 正负序电压 a 轴夹角满足式(8)。

以 a 相电流为例, 对式(5)和式(6)进行 Park 反变换可得三相静止坐标系下的光伏 a 相短路电流正

负序分量为:

$$i_a^{(m)} = \begin{bmatrix} i_d^{(m)} \cos(\omega_g t + \Delta\theta_f^{(m)} - \Delta\theta^{(m)}) + \\ (-1)^m i_q^{(m)} \sin(\omega_g t + \Delta\theta_f^{(m)} - \Delta\theta^{(m)}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

光伏短路电流正负序分量主要受电流内环控制响应过程、锁相暂态过程影响。联立式(5)和式(6),光伏a相短路电流正负序分量表达式为:

$$i_a^{(m)} = i_{as}^{(m)} + i_{at}^{pll(m)} + i_{at}^{pi(m)} \quad (13)$$

式中: $i_{as}^{(m)}$ 为正负序短路电流稳态分量; $i_{at}^{pll(m)}$ 为正负序锁相暂态电流分量; $i_{at}^{pi(m)}$ 为电流内环控制响应正负序暂态电流分量。其中 $i_{as}^{(m)}$ 、 $i_{at}^{pll(m)}$ 、 $i_{at}^{pi(m)}$ 分别为:

$$i_{as}^{(m)} = I_f^{(m)*} \cos(\omega_g t + \Delta\theta_f^{(m)} - (-1)^m \psi_f^{(m)}) \quad (14)$$

$$i_{at}^{pll(m)} = 2I_f^{(m)*} \sin\left(\frac{\Delta\theta^{(m)}}{2}\right) \sin\left(\omega_g t - (-1)^m \psi_f^{(m)} + \Delta\theta_f^{(m)} - \frac{\Delta\theta^{(m)}}{2}\right) \quad (15)$$

$$i_{at}^{pi(m)} = \frac{e^{-\frac{K_i}{1+K_p}t}}{1+K_p} \begin{bmatrix} I_0^{(m)*} \cos\left(\omega_g t - (-1)^m \psi_0^{(m)} + \Delta\theta_f^{(m)} - \Delta\theta^{(m)}\right) - \\ I_f^{(m)*} \cos\left(\omega_g t - (-1)^m \psi_f^{(m)} + \Delta\theta_f^{(m)} - \Delta\theta^{(m)}\right) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $I_0^{(m)*}$ 和 $I_f^{(m)*}$ 分别为故障前和故障后正负序短路电流参考值幅值; $\psi_0^{(m)}$ 和 $\psi_f^{(m)}$ 分别为故障前和故障后正负序电流短路电流参考值相位。

$I_0^{(m)*}$ 、 $\psi_0^{(m)}$ 、 $I_f^{(m)*}$ 、 $\psi_f^{(m)}$ 分别为:

$$I_0^{(m)*} = \sqrt{(i_{d0}^{(m)*})^2 + (i_{q0}^{(m)*})^2}, \quad \psi_0^{(m)} = \arctan\left(\frac{i_{q0}^{(m)*}}{i_{d0}^{(m)*}}\right),$$

$$I_f^{(m)*} = \sqrt{(i_{df}^{(m)*})^2 + (i_{qf}^{(m)*})^2}, \quad \psi_f^{(m)} = \arctan\left(\frac{i_{qf}^{(m)*}}{i_{df}^{(m)*}}\right). \quad (17)$$

故障后计及锁相暂态的正负双序控制光伏a相短路电流可以表示为:

$$i_a = i_a^{(1)} + i_a^{(2)} \quad (18)$$

当电网发生不对称故障后,由于电流内环控制具有快速响应特性, $i_{at}^{pi(m)}$ 会在极短的时间内衰减为0,因此短路电流暂态特性主要由 $i_{at}^{pll(m)}$ 决定。由于单相接地故障时,故障后正负序电压相角跳变方向相同,因此故障初始阶段正负序电压锁相偏差符号相同,正负序锁相暂态电流分量符号相同,相互叠加使得锁相暂态电流对短路电流计算影响更大;而两相短路接地故障和两相短路故障正负序电压相角

跳变方向相反,正负序锁相暂态电流分量抵消。因此,相较于两相短路接地故障和两相短路故障,本文所提短路电流计算方法在计算单相接地故障时有更好的效果。

4 算例分析

搭建如图5所示的光伏发电系统仿真模型,仿真系统具体参数如表1所示。

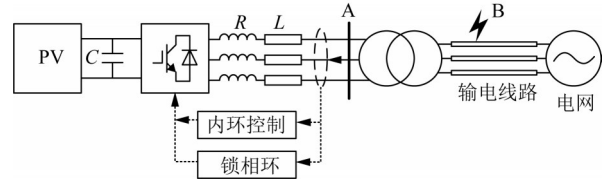


图5 光伏发电系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of photovoltaic power generation system

表1 仿真系统参数

Tab. 1 Simulation system parameters

参数	数值
变压器变比k/kV	0.25/25
光伏额定容量S/MVA	0.25
光伏滤波电感L/ μ H	8
光伏滤波电阻R/m Ω	50
输电线路长度 L_{line} /km	5
光伏直流母线电容C/ μ F	8 000
光伏PLL控制参数 $k_{pll.p}$ 、 $k_{pll.i}$	180 3 200
线路单位长度电阻 $r/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.115 3
线路单位长度电容 $c/(\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$	11.33
线路单位长度电感 $l/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	1.05

1) 单相接地故障

在B点发生a相单相接地故障时过渡电阻为1 Ω 。此刻,PCC处a相电压相较故障前的0.960 p. u. 瞬间降至0.379 p. u.; b相电压略微上升至1.159 p. u.; 而c相电压幅值无明显变化。三相电压相角急剧变化,分别为-0.425、-0.163、0.164。电压不对称导致光伏输出功率出现二倍频波动,为提供电压支撑并抑制功率波动,光伏输出设为0.2 p. u. 的有功功率期望值和1.2 p. u. 的无功功率期望值。式(2)计算得到正序d、q轴电流控制参考值分别为0.166 p. u. 和0.996 p. u.; 负序d、q轴电流控制参考值分别为-0.028 p. u. 和0.166 p. u.。

单相接地故障后, a、b、c 三相短路电流仿真波形与式(17)的解析波形、解析波形与仿真波形的误差百分数曲线见图 6。故障后短路电流发生跃变, 暂态过程中幅值波动, 采用正负双序控制的光伏发电系统, 在负序电流注入下光伏短路电流在稳态下存在不对称, 故障稳态后 a、b、c 三相电流幅值分别为 0.964 p. u.、0.997 p. u.、0.556 p. u.。在故障初始的一个周期内误差达到最大值, 最大误差小于 5%, 在故障发生后的 0.05 s 内, 误差降至小于 3%, 0.2 s 后达到故障稳态, 误差小于 0.1%。

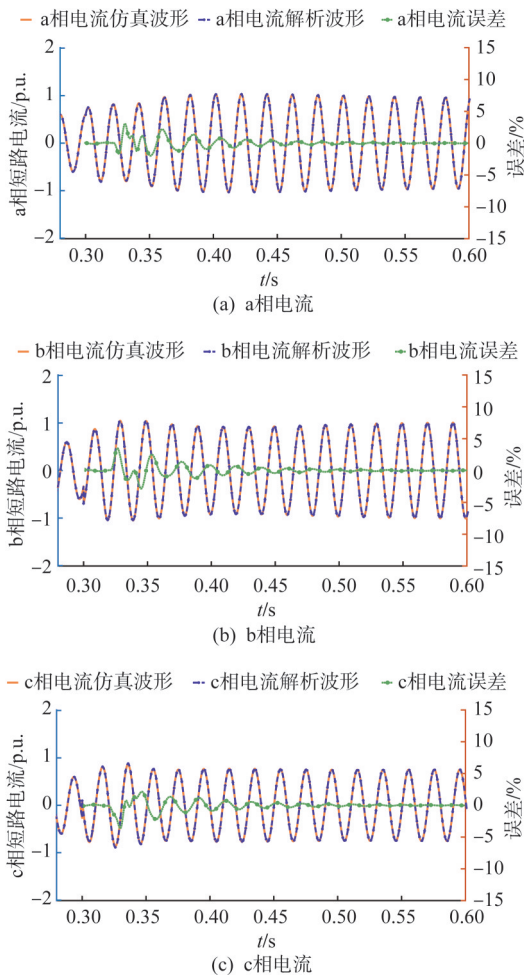


图 6 单相接地故障时光伏短路电流与误差

Fig. 6 Photovoltaic short-circuit currents and errors during single-phase ground fault

图 7 为考虑锁相偏差和不考虑锁相偏差下计算的 a 相短路电流解析波形以及仿真波形和考虑锁相偏差和不考虑锁相偏差下 a 相短路电流计算误差百分数。发生单相接地故障后, 在故障初始阶段不考虑锁相偏差计算的短路电流出现较大误差, 误差超

过 10%, 并在一个周期后进一步增大, 达到 19.6%。考虑锁相偏差计算的短路电流误差不超过 5%。因此, 计及锁相偏差的光伏短路电流计算方法针对单相接地故障, 具有较好的适用性, 能够以较高精度计算单相接地故障下光伏输出短路电流。

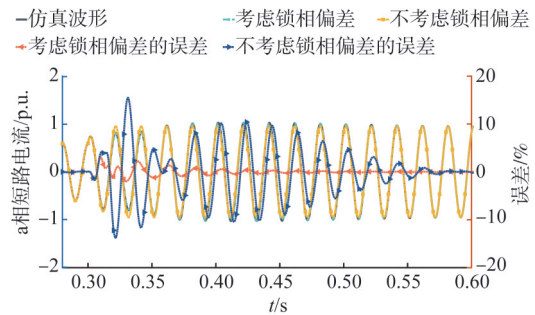


图 7 锁相偏差对短路电流计算的影响

Fig. 7 Impact of phase-locked loop deviation on short-circuit current calculation

2) 两相短路接地故障

B 点发生 bc 两相短路接地故障, 过渡电阻为 1Ω 。在故障发生时刻, PCC 处 a 相电压小幅抬升, 由故障前的 0.960 p. u. 抬升至 1.139 p. u.; b、c 相电压幅值相近, 跌落超过一半, 变为 0.437 p. u. 和 0.461 p. u.。三相电压相角发生明显跳变, a、b、c 三相电压相角分别向后跳变 0.002、0.173、0.528。此时, 有功功率期望值和无功功率期望值分别为 0.2 p. u. 和 1.2 p. u., 经式(2)计算正序 d 、 q 轴电流控制参考值分别为 0.222 p. u. 和 1.322 p. u.; 负序 d 、 q 轴电流控制参考值分别为 -0.069 p. u. 和 0.411 p. u.。

两相短路接地故障后 a、b、c 三相短路电流仿真波形与经式(17)计算的解析波形、解析波形与仿真波形间的误差百分数曲线如图 8 所示。故障期间, 短路电流解析波形与仿真波形间的拟合程度较好。相较于单相接地故障, 误差略有增加, 但总体误差均小于 10%。在故障初始的 2 个周期内误差达到最大值, 此时 b 相电流最大误差为 9.13%, 在后续的 2 个周期内误差小于 5%, 稳态误差小于 0.1%。计算误差满足电力系统短路电流计算的要求。

图 9 为考虑锁相偏差和不考虑锁相偏差下计算的 bc 两相短路接地故障时 a 相电流解析波形以及仿真波形和考虑锁相偏差和不考虑锁相偏差下 a 相短

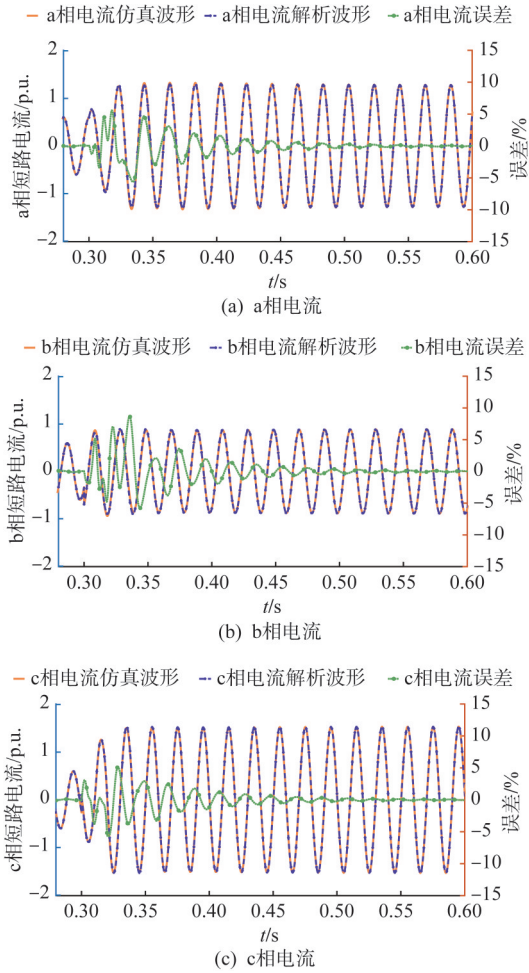


图8 两相短路接地故障时光伏短路电流与误差

Fig. 8 Photovoltaic short-circuit currents and errors during two-phase short-circuit to ground fault

路电流计算误差百分数。相较于单相接地故障,输电线路发生bc两相短路接地故障时,在故障发生后的0.05 s至0.25 s,考虑锁相偏差时的计算误差小于4%,显著小于不考虑锁相偏差时的短路电流计算误差。考虑锁相偏差时故障全过程计算误差小于9%,计算准确性较高。本文所提出的光伏短路电流计算方法能较好地适用于两相短路接地故障。

3) 两相短路故障

B点发生bc两相短路故障,过渡电阻为 $1\ \Omega$ 。在故障发生时刻PCC处a相电压无明显变化,仍维持在0.96 p.u.附近,相角向后小幅跳变 -0.058 ;b、c相电压幅值均有不同程度的跌落,分别变为0.725 p.u.和0.546 p.u.。b、c两相电压相位跳变量分别达到 -0.512 和 0.151 。有功功率期望值和无功功率期望值分别为0.2 p.u.和1.2 p.u.。经式

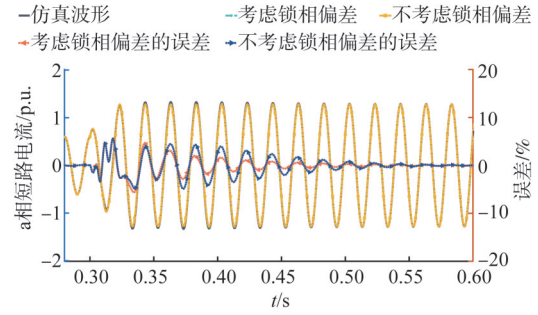


图9 锁相偏差对短路电流计算的影响

Fig. 9 Impact of phase-locked loop deviation on short-circuit current calculation

(2) 计算正序 d 、 q 轴电流控制参考值分别为0.212 p.u.和1.274 p.u.;负序 d 、 q 轴电流控制参考值分别为 -0.076 p.u.和0.456 p.u.。

两相短路故障后a、b、c三相短路电流仿真波形与经式(17)计算的解析波形、解析波形与仿真波形间的误差百分数曲线如图10所示。两相短路故障期间短路电流解析波形与仿真波形拟合程度较好,故障全过程最大误差为8.47%,在故障稳态时三相电流幅值不对称,计算误差小于0.1%。

图11为考虑锁相偏差和不考虑锁相偏差下计算的bc两相短路故障时a相电流解析波形以及仿真波形和考虑锁相偏差和不考虑锁相偏差下a相短路电流计算误差百分数。相较于单相接地故障,输电线路发生bc两相短路故障时,在故障发生后的0.07 s至0.2 s内考虑锁相偏差时的计算误差小于4.5%,全过程计算误差均小于8.5%,计算准确性较高。因此本文所提出的光伏短路电流计算方法能较好地适用于两相短路故障。

当输电线路发生不对称故障时PCC点的三相电压会出现明显的不对称现象。PCC电压将显著具有负序分量,同时正负序电压相角也会发生不同程度的跳变。光伏发电系统采用正负双序控制,相角跳变会导致PLL跟踪过程中的锁相偏差,从而对短路电流计算的准确性产生负面影响。经过仿真分析发现,锁相偏差的衰减需要经历几百毫秒。在此期间,短路电流的幅值和相角都处于不稳定的波动状态。因此,不对称故障时考虑锁相偏差对短路电流计算的影响是必要的。

由表2所示,在故障发生后的0.1 s内,本文所提短路电流计算方法的计算误差平均值在不同类型的不对称短路故障下不超过2.2%,计算误差有效

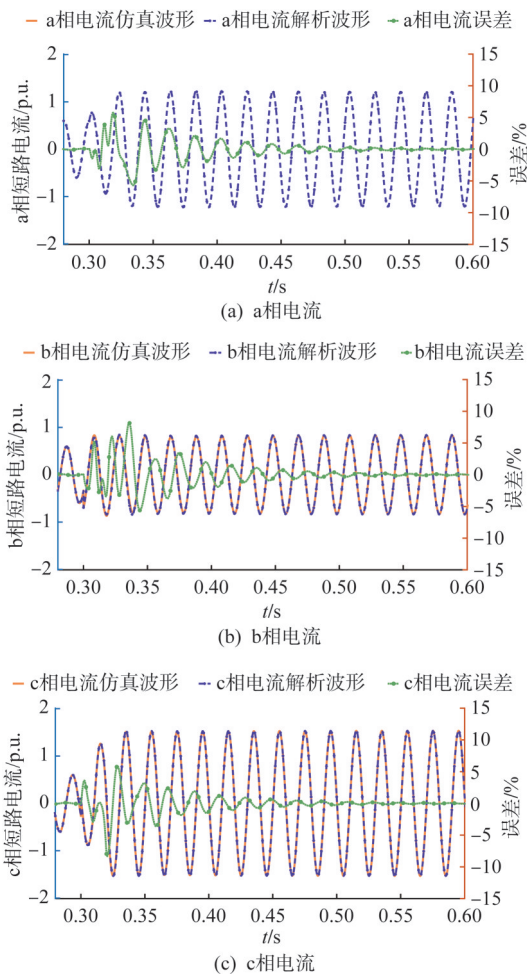


图 10 两相短路故障时光伏短路电流与误差
Fig. 10 Photovoltaic short-circuit currents and errors during two-phase short-circuit fault

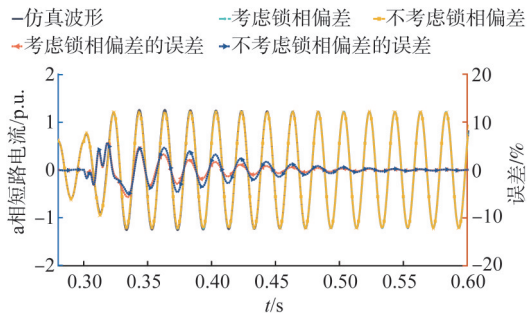


图 11 锁相偏差对短路电流计算的影响
Fig. 11 Impact of phase-locked loop deviations on short-circuit calculation

值不超过 2.8 %；在 0.1~0.2 s 内计算误差平均值和有效值均不超过 0.6 %。相对于不考虑锁相偏差的光伏短路电流计算方法，本文提出的正负双序控制光伏短路电流计算方法在单相接地故障时表现出更小的误差，具备更高的计算准确性。对于两相短路

故障和两相短路接地故障，该方法同样能提供较高的计算精度，并相对于不考虑锁相偏差的短路电流计算方法有所提高。因此，本文所提方法对于提升光伏发电系统的保护和控制准确性具有显著帮助。

表 2 计算误差对比表

Tab. 2 Calculation errors comparison table %

故障类型	误差类型	考虑锁相偏差		不考虑锁相偏差	
		0~0.1 s	0.1~0.2 s	0~0.1 s	0.1~0.2 s
单相接地故障	平均值	1.103	0.250	5.670	6.205
	有效值	1.390	0.310	7.331	7.038
两相短路 接地故障	平均值	1.952	0.455	2.195	1.334
	有效值	2.367	0.553	2.618	1.593
两相短路故障	平均值	2.149	0.477	2.341	0.941
	有效值	2.773	0.583	2.881	1.153

5 结论

本文针对光伏发电系统，充分考虑锁相暂态过程对光伏短路电流的影响，推导了相角跳变引起的故障后正负序电压锁相偏差的时域表达式；考虑锁相偏差对光伏输出短路电流的影响，推导了电网发生不对称故障时光伏短路电流表达式，提出了一种计及锁相暂态的正负双序控制光伏短路电流计算方法。通过本文研究，得出以下主要结论。

- 1) 光伏接入点电压相角跳变打破了原本稳定的 PLL 工作状态，PLL 输出的相角与 PCC 的相角之间会存在偏差，偏差的初始值与相角跳变的量密切相关，衰减时间与 PLL 控制参数和故障程度有关。
- 2) 锁相偏差的衰减通常需要几百毫秒时间。在此期间短路电流的幅值和相角会处于不稳定的波动状态。在锁相偏差衰减的过程中忽略锁相偏差使光伏短路电流的计算出现一定程度的误差。
- 3) 不同故障类型、故障程度下，考虑锁相偏差对短路电流计算准确性的提高程度与相角跳变量有关。锁相偏差越大，锁相暂态过程对短路电流影响程度越深，锁相暂态电流的大小和持续时间与锁相偏差的大小和衰减时间呈现正相关。

参考文献

[1] 邓韦斯, 孟子超, 王皓怀, 等. 新能源功率预测特性分析及精度提升措施[J]. 南方电网技术, 2023, 17(2): 11-23.
DENG Weisi, MENG Zichao, WANG Haohuai, et al. Renewable energy power prediction characteristics analyses and accuracy improvement measures [J]. Southern Power System

- Technology, 2023, 17(2): 11 – 23.
- [2] 欧阳金鑫, 唐挺, 郑迪, 等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 216 – 224.
- OUYANG Jinxin, TANG Ting, ZHENG Di, et al. Characteristics and calculation method of short-circuit current for doubly fed wind turbine under low voltage ride-through control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 216 – 224.
- [3] 谢东, 刘明波, 徐立新. 含分布式能源电力系统输配协调优化研究综述及展望[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 25 – 37.
- XIE Dong, LIU Mingbo, XU Lixin. Review and prospect of transmission-distribution co-optimization of power systems with distributed energy resources [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 25 – 37.
- [4] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1 – 14.
- DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the impact of large-scale photovoltaic generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1 – 14.
- [5] 刘江, 高淑萍, 孙向东, 等. 弱电网下光伏并网逆变器谐振抑制方法综述[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 65 – 71.
- LIU Jiang, GAO Shuping, SUN Xiangdong, et al. Overview of resonance suppression methods for pv grid-connected inverters in weak grid [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 65 – 71.
- [6] BOUTSIKA T N, PAPATHANASSIOU S A. Short-circuit calculations in networks with distributed generation [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1181 – 1191.
- [7] 孙景钊, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变器分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71 – 76.
- SUN Jingliu, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Adaptive current speedy trip protection for distribution networks with inverter-based distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71 – 76.
- [8] 匡晓云, 方煜, 关红兵, 等. 适用于含新能源逆变电源网络的全时域短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 113 – 122.
- KUANG Xiaoyun, FANG Yu, GUAN Hongbing, et al. Time-domain short-circuit current calculation method applicable to power networks with new energy inverter sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 113 – 122.
- [9] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 计及逆变器分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 92 – 96, 108.
- WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault analysis method for distribution networks considering control characteristics of inverter-based distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92 – 96, 108.
- [10] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含PQ控制逆变器分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555 – 561.
- PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis method for distribution networks with PQ-controlled inverter-based distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555 – 561.
- [11] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41 – 49.
- ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetrical short circuit calculation of power grids with inverter-based distributed generation injecting negative sequence current [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41 – 49.
- [12] 曾德辉, 潘国清, 王钢, 等. 含V/f控制DG的微电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2604 – 2611.
- ZENG Dehui, PAN Guoqing, WANG Gang, et al. Fault analysis method for microgrid with V/f controlled distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2604 – 2611.
- [13] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65 – 74, 13.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault current characteristics and analysis method for power grids with inverter-based distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65 – 74, 13.
- [14] 郭文明, 牟龙华. 考虑灵活控制策略及电流限幅的逆变型分布式电源故障模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6359 – 6367.
- GUO Wenming, MU Longhua. Fault model of inverter-based distributed generation considering flexible control strategy and current limiting [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6359 – 6367.
- [15] 刘素梅, 毕天姝, 王晓阳, 等. 具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 66 – 73.
- LIU Sumei, BI Tianshu, WANG Xiaoyang, et al. Fault current characteristics of inverter-based new energy power source with asymmetrical fault ride-through capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 66 – 73.
- [16] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2622 – 2633, 2830.
- WU Guanglu, ZHOU Xiaoxin, WANG Shanshan, et al. Interaction mechanism analysis of phase-locked loop and current inner loop for flexible DC transmission accessing weak AC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2622 – 2633, 2830.
- [17] 王铁柱, 卜广全, 董毅峰, 等. 考虑锁相环动态的柔性直流输电电机暂态模型[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2055 – 2061.
- WANG Tiezhu, BU Guangquan, DONG Yifeng, et al. Electromechanical transient model of flexible DC transmission considering dynamic characteristics of phase-locked loop [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2055 – 2061.
- [18] 贾科, 刘浅, 杨彬, 等. 计及锁相环动态特性的逆变电源故障暂态电流解析[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4242 – 4251.
- JIA Ke, LIU Qian, YANG Bin, et al. Analysis of transient fault current for inverter power source considering dynamic characteristics of phase-locked loop [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4242 – 4251.
- [19] 郑涛, 邹芑莹, 王子鸣. 计及锁相环动态响应特性的光伏并网系统故障电流解析计算[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4656 – 4667.