

光伏并网系统故障二次谐波产生机理及其对 变压器保护的影响

郑涛¹, 黄予园¹, 宗伟¹, 李菁¹, 王兴国², 王文焕², 赵宏程³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院有限公司电网安全与节能国家重点实验室, 北京 100192; 3. 国网西藏电力有限公司电力科学研究院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 光伏发电系统通过逆变器矢量控制并网, 其短路暂态特性异于传统电源。电网发生故障时, 光伏系统输出电流中可能含有二次谐波, 接入弱电网时二次谐波的影响不可忽略。以光伏并网发电系统对称故障条件为例, 首先分析基于锁相环的三相并网逆变器单频率输入双频率输出的现象产生机理。其次在综合考虑并网控制及系统低电压穿越策略切换的影响基础上, 分析故障暂态过程中电流二次谐波产生机理并推导二次谐波解析表达式。指出在变压器区内故障时光伏并网系统产生的二次谐波可能威胁变压器差动保护的可靠性。最后基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证理论分析的正确性, 为后续光伏发电系统接入后的电网继电保护适应性分析提供参考。

关键词: 光伏并网系统; 暂态特性; 变压器保护; 二次谐波; 矢量控制

Second harmonic generation mechanism of a photovoltaic grid-connected system fault and its influence on transformer protection

ZHENG Tao¹, HUANG Yuyuan¹, ZONG Wei¹, LI Jing¹, WANG Xingguo², WANG Wenhuan², ZHAO Hongcheng³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 3. State Grid Tibet Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Lhasa 850000, China)

Abstract: A photovoltaic power generation system is controlled by an inverter vector, and its short-circuit transient characteristics are different from those of the traditional power supply. When the power grid fails, its output current may contain the second harmonic, and the influence of these second harmonics when connected to the weak grid cannot be ignored. Taking the symmetrical fault condition of a photovoltaic grid-connected power generation system as an example, this paper first analyzes the phenomenon of single-frequency input dual-frequency output of a three-phase grid-connected inverter based on phase-locked loop, and secondly considers grid-connected control and system low-voltage crossing. Based on the influence of policy switching, the mechanism of current second harmonic generation in the fault transient process is analyzed and the second harmonic analysis expression is derived. It is pointed out that the second harmonic generated by photovoltaic grid-connected system may threaten the reliability of transformer differential protection when the fault occurs in the transformer zone. Finally, based on the correctness of PSCAD/EMTDC simulation verification theory, it provides a reference for the adaptive analysis of grid relay protection after the subsequent PV system.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technologies and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of Chinese Academy of Electric Power (No. JBB51201901542) (Alibaba-Tibet-China Networking Project Protection Adaptability Analysis).

Key words: photovoltaic grid-connected system; transient characteristics; transformer protection; second harmonic; vector control

0 引言

近年来, 随着可再生能源由补充能源向替代能

源过渡, 光伏并网发电因不受能源资源、原材料和应用环境的限制而得到广泛应用。光伏发电系统渗透率不断提高, 其短路电流特性对电力系统继电保护的影响不断凸显, 提高含大规模光伏接入的复杂电网运行的安全性正受到越来越多的关注^[1-3]。

准确掌握光伏发电并网系统短路电流特性是解决含大规模光伏并网电力系统继电保护问题的关

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助(2016YFB0900600); 中国电科院科技项目资助(JBB51201901542)“阿里-藏中联网工程保护适应性分析”

键。当前,国内外学者对光伏并网系统接入电网的研究主要侧重于含光伏电源接入的配网的继电保护^[4-8],而对光伏电源接入的电力设备保护的影响缺乏相关分析。光伏发电并网系统通过电压源型逆变器将直流电转换成交流电,大量电力电子器件的引入,使得光伏发电并网系统在故障发生初期和故障切除过程中的暂态特性极为复杂。针对光伏发电并网系统谐波分量的引入,国内外学者已开展了部分相关研究工作。一方面光伏逆变器本身的调制、死区等因素会产生高、低次谐波电流^[9-11],另一方面电网谐波电压^[12]与三相不平衡等因素也会致使光伏逆变器产生不同次数的谐波电流^[13-15]。西班牙学者 V. Salas 等通过实验论证了光伏并网系统中存在谐波电流注入问题^[16]。文献[17]指出电网故障状态下低电压穿越控制策略切换使内环控制在非线性区和非线性区 2 种工况下产生不同的暂态过程,其中在非线性工作区短路瞬间由于饱和现象导致闭环系统的性能下降,在交流侧产生长达 1 个工频周波的短路暂态尖峰电流。文献[18]针对逆变型电源的故障电流特性与传统发电机不同,忽略逆变器接口的惯性时间常数,近似认为电网故障情况下逆变型电源交流电流中不含衰减直流量和基频自由分量,未考虑暂态期间并网电流含有的谐波分量对继电保护产生的影响。文献[19]分析了含逆变型电源接入的并网系统从故障发生到切除的全过程中电源的运行机制及电磁暂态特性,指出故障后暂态过渡期间(故障后 0.02~0.1 s 期间)输出电流中含有较多以指数规律衰减的谐波分量,并通过 RTDS 实时仿真验证了在故障初始阶段逆变型电源输出电流中直流量占基频分量的 34.3%,二次谐波分量达 38.97%,但未进一步分析故障暂态谐波产生机理及其对继电保护的影响。

本文依据国家电网公司关于光伏电站接入电网的技术规范^[20],在考虑 dq/abc 坐标系变换产生单电量输入双电量输出(SIDO)现象^[21]的基础上,分析并网控制和低电压穿越控制条件下短路暂态过程中并网电流中所含二次谐波分量产生机理,指出故障期间并网电流中的衰减直流量引入逆变器控制环节会进一步引发二次谐波分量,在外部电网较弱场景下,当光伏电站升压站主变高压侧出口故障时,由于光伏电源侧短路电流占比较大,此时变压器电流差动保护中差流主要为光伏电站侧短路电流,其短路电流中含有的谐波分量影响不可忽略,甚至可能出现变压器区内故障时因二次谐波分量较大而发生误闭锁情况,影响差动保护动作可靠性,危及变压器和系统的安全稳定运行。最后基于 PSCAD/

EMTDC 电磁暂态仿真结果验证了理论分析的正确性。

1 单电量输入产生双电量输出原理

派克变换与反变换是实现两种坐标系下变量转换的数学方法,其本质是一种频率的变换,在逆变器控制中发挥着重要的作用。光伏发电系统采用 DC/AC 逆变器将直流电转换为与电网电压同频同相的交流电,多采用基于电网电压定向的双闭环矢量控制。正常运行情况下,矢量 F 在 dq 同步旋转坐标系下的分量 f_d, f_q 为直流量;故障情况下, dq 轴分量中可能产生周期波动分量。

假设两相同步旋转坐标下的 dq 轴分量为

$$\begin{cases} f_d = F_d \cos(\omega_d t + \varphi_d) \\ f_q = F_q \sin(\omega_q t + \varphi_q) \end{cases} \quad (1)$$

式中:下标 d, q 分别表示两相旋转坐标系下的 d, q 轴分量; F_d 表示 d 轴分量幅值; ω_d 表示 d 轴分量频率; φ_d 表示 d 轴分量相角, q 轴与 d 轴类似。

正常运行情况下,逆变器内部变量的 dq 轴分量幅值、频率及相角皆相等。经派克反变换,将上述分量至两相静止坐标系下有

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & -\sin(\omega_1 t) \\ \sin(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_d [\cos(\omega_1 t + \omega_d t + \varphi_d) + \cos(\omega_1 t - \omega_d t - \varphi_d)] + \\ \frac{1}{2} F_q [\cos(\omega_1 t + \omega_q t + \varphi_q) - \cos(\omega_1 t - \omega_q t - \varphi_q)] \\ F_d [\sin(\omega_1 t + \omega_d t + \varphi_d) + \sin(\omega_1 t - \omega_d t - \varphi_d)] + \\ \frac{1}{2} F_q [\sin(\omega_1 t + \omega_q t + \varphi_q) - \sin(\omega_1 t - \omega_q t - \varphi_q)] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,下标 α, β 分别表示两相静止坐标系下的 α, β 轴分量。

将上式表示为矢量形式有:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= f_\alpha + \mathrm{j}f_\beta = \\ & \frac{1}{2} [F_d \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1 t + \omega_d t + \varphi_d)} + F_d \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1 t - \omega_d t - \varphi_d)} + \\ & F_q \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1 t + \omega_q t + \varphi_q)} - F_q \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1 t - \omega_q t - \varphi_q)}] \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表明,若两相同步旋转坐标系下 d 轴(或 q 轴)分量频率为 ω_d (或 ω_q),则它在两相静止坐标系下将产生 $\omega_1 \pm \omega_d$ (或 $\omega_1 \pm \omega_q$) 的两种频率分量。只有当 dq 轴分量角度相等、幅值相等且频率相同时,上式中的 $\omega_1 - \omega_d$ 与 $\omega_1 - \omega_q$ 频率分量才可抵消,仅剩 $\omega_1 + \omega_d$ 分量。否则 d 轴和 q 轴分量经派克反变换转换至两相静止坐标系下后,将分别产生 $\omega_1 \pm \omega_d$ 和

$\omega_1 \pm \omega_q$ 的两种频率分量。以上即为由于 dq 轴分量不对称引起 SIDO 现象的原理。

基于上述分析可知,短路电流 dq 轴分量由同步旋转坐标系转换为静止坐标系后产生二次谐波的条件为: i_d 或 i_q 中含有基频波动分量,即 $\omega_{d/q} = \omega_1$ 。同时,在 $\omega_d \neq 0$, $\omega_q \neq 0$ 且 dq 轴分量不对称时,静止坐标系下可能产生四种频率的波动分量。

2 光伏并网系统短路电流二次谐波分量产生机理

典型光伏并网发电系统逆变器控制原理如下:逆变器采用双环控制方式,其中外环控制包括最大功率点跟踪环节(MPPT)和直流电压外环控制^[22-23];内环采用 dq 旋转坐标系下的电流解耦控制。控制器检测到电网电压跌落即断开 MPPT 控制^[24]。

2.1 并网控制下逆变器暂态响应特性

2.1.1 电压外环控制产生电流二次谐波分量机理

电网发生三相短路故障瞬间,电网电压突变引起并网电流中基波量迅速增大,同时存在一定的直流衰减分量^[19],其衰减速度快,一般为数十毫秒。而电力电子器件的响应速度为微秒级^[25],该直流衰减分量引入控制环节,可能引发二次谐波分量,以下进行具体分析。

电网电压跌落瞬间,并网电压、电流矢量分别表示为

$$U_g = U_1 e^{j\omega_1 t} e^{j\theta_1 t} \quad (4)$$

$$I_g = I_1 e^{j\omega_1 t} e^{j\theta_1 t} + I_0 e^{-t/\tau_{dc}} \quad (5)$$

式中: U_1 、 I_1 、 I_0 分别为故障后电压基频分量、电流基频分量及其衰减直流分量的幅值; θ_1 、 θ_i 分别为电压、电流基频分量初始相角; τ_{dc} 为暂态直流分量的衰减时间常数。

根据式(4)、式(5)可计算电网侧输出有功功率^[26]:

$$P_g = 1.5 \operatorname{Re}[U_g I_g^*] = 0.5[S_1 + S_1^* + (S_0 e^{j\omega_1 t} + S_0^* e^{-j\omega_1 t}) e^{-t/\tau_{dc}}] \quad (6)$$

式中, $S_1 = 1.5 U_1 I_1^*$, $S_0 = 1.5 U_1 I_0^*$

由式(6)可见,电网电压突然跌落后,受暂态过程中直流分量的影响,有功功率将出现基频衰减的波动分量。

忽略逆变器的损耗,直流电容平衡方程^[27]可以表示为

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{pv} - i_g = \frac{P_{pv} - P_g}{U_{dc}} \quad (7)$$

式(7)中: U_{dc} 为直流侧直流母线电压; i_{pv} 为光伏电

池板输出电流; i_g 为光伏电池板输入到逆变器直流侧的电流; P_{pv} 为光伏电池板输出功率; p_g 为光伏侧向电网侧传输的有功功率。

在短路瞬间通常认为 P_{pv} 保持不变^[28],由式(7)可知,暂态瞬间直流分量的引入使得光伏并网系统输出有功功率 P_g 产生基频波动分量,此功率波动分量会引起直流母线电压中也出现基频分量。设直流母线电压的基频波动分量为

$$\Delta U_{dc} = U_{dch} \cos(\omega_1 t + \varphi_{dc}) e^{-t/\tau_{dc}} \quad (8)$$

式(8)中: U_{dch} 表示直流母线电压基频波动分量幅值; φ_{dc} 表示直流母线电压初始相角。

在电网电压跌落程度不深的情况下, d 轴电流内环参考值仍受电压外环控制,逆变器控制简化示意图如图 1 所示。

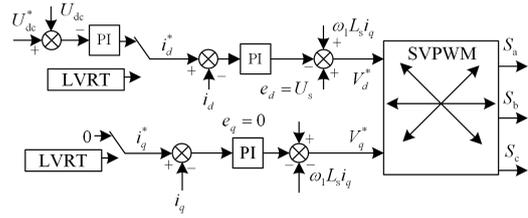


图 1 逆变器控制简化示意图

Fig. 1 Converter schematic simplified schematic

根据逆变器控制原理,由直流侧电压 U_{dc} 到逆变器电流 d 轴分量的控制框图如图 2 所示。

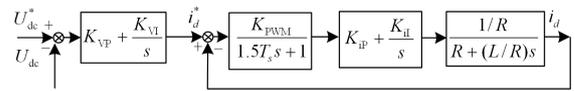


图 2 直流母线电压至逆变器内环 d 轴分量的控制框图

Fig. 2 Control block diagram of DC bus voltage to the d -axis component of the inner ring of the converter

图 2 中: $K_{vp} + K_{vl}/s$ 为外环电压 PI 调节器的传递函数; $K_{ip} + K_{il}/s$ 为内环电流 PI 调节器的传递函数; 一阶惯性环节 $K_{pwm}/(1.5T_s s + 1)$ 为逆变器传递函数,其中, T_s 为电流内环采样周期, K_{pwm} 为逆变器等效增益; $(1/R)/(R + (L/R)s)$ 为交流侧滤波器的传递函数。由图 2 得到逆变器直流电压偏差至内环电流 d 轴分量的传递函数为

$$W_v = \frac{i_d(s)}{U_{dc}^* - U_{dc}} \approx \frac{\omega_1 K_{pwm}}{L} (K_{vp} + \frac{K_{vl}}{s}) \frac{K_{ip}s + K_{il}}{(s + \zeta_1)(s + \zeta_2)} \quad (9)$$

其中

$$\zeta_{1,2} = \frac{(R + K_{\text{pwm}}K_{\text{ip}})\omega_1 \pm \sqrt{[(R + K_{\text{pwm}}K_{\text{ip}})\omega_1]^2 - 4\omega_1 L K_{\text{pwm}}K_{\text{il}}}}{2L} \quad (10)$$

由式(9)得两相旋转坐标系下直流母线电压基频波动分量引起逆变器内环 d 轴电流分量中产生基频波动分量的时域表达式为

$$\Delta i_{d1}(t) = -\frac{\omega_{11}K_{\text{pwm}}}{2L} (\mathbf{E}_\kappa \mathbf{U}_{\text{dch}} e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{\text{dc}}} + \mathbf{E}_\kappa^* \mathbf{U}_{\text{dch}}^* e^{-j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{\text{dc}}}) \quad (11)$$

其中,

$$\mathbf{E}_\kappa = \frac{[K_{\text{vp}}(j\omega_1 - 1/\tau_{\text{dc}}) + K_{\text{vi}}][K_{\text{ip}}(j\omega_1 - 1/\tau_{\text{dc}}) + K_{\text{il}}]}{(j\omega_1 - 1/\tau_{\text{dc}})(j\omega_1 - 1/\tau_{\text{dc}} + \zeta_1)(j\omega_1 - 1/\tau_{\text{dc}} + \zeta_2)} \quad (12)$$

由于 dq 轴解耦独立控制, dq 轴分量在故障的暂态过程中存在不对称性。由第 1 节 d 轴分量的含有基频波动经派克反变换产生二次谐波原理可知, 逆变器电流 d 轴分量中的基频分量会引起静止坐标系下的二次谐波分量, 结合式(3)和式(11)可得静止坐标系下二次谐波分量表达式为

$$\mathbf{i}_{\text{gh}} = \frac{\omega_1 K_{\text{pwm}}}{2L} |\mathbf{E}_\kappa \mathbf{U}_{\text{dch}}| e^{j(2\omega_1 t + \theta_{\text{dc}})} e^{-t/\tau_{\text{dc}}} \quad (13)$$

式中, θ_{dc} 为矢量 $|\mathbf{E}_\kappa \mathbf{U}_{\text{dch}}|$ 的角度。

2.1.2 电网电压二次谐波扰动分量

光伏并网发电系统输出的二次谐波相当于电流源注入电网, 并网电流所含谐波分量将影响并网电压, 使得并网电压中也含有二次谐波扰动分量。考虑电网电压中含有二倍频分量, 电网电压可表示为

$$\begin{cases} U_a = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_u) + U_2 \sin(2\omega_1 t + \varphi_{hu}) \\ U_b = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_u - 120^\circ) + U_2 \sin(2\omega_1 t + \varphi_{hu} - 120^\circ) \\ U_c = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_u + 120^\circ) + U_2 \sin(2\omega_1 t + \varphi_{hu} + 120^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_1 为电网电压基频分量的幅值; U_2 为故障条件下交流侧所含二倍频电压的幅值; φ_u, φ_{hu} 分别为光伏系统并网电压中所含基频分量、二倍频分量的初始相角。

将式(14)经派克变换转换为两相同步旋转坐标系, 表示为矢量形式^[17]如下:

$$\mathbf{U}_{\text{gd}} = U_1 e^{j\varphi_u} + U_2 e^{j\varphi_{hu}} e^{j\omega_1 t} \quad (15)$$

基于上述分析, 逆变器暂态短路电流所含直流衰减分量引入直流电压外环控制环节会引发电流中产生二次谐波分量, 同时, 并网电压中含有相应的二次谐波电压分量。

2.1.3 计及电网电压谐波扰动时电流内环控制产生电流二次谐波机理

电流内环的控制框图如图 3 所示, 由于 dq 轴独立控制, 且内环控制结构对称, 以下以 d 轴控制为例。

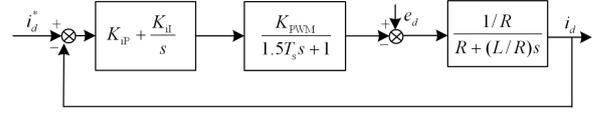


图 3 d 轴电流内环控制框图

Fig. 3 d -axis current inner loop control block diagram

结合图 3 逆变器 d 轴内环控制框图可知, d 轴实际电流受两种输入量的影响, 1) 电压扰动项 e_d , 与电压跌落程度有关; 2) d 轴内环电流参考值 i_d^* , 电压跌落 90% 以上时, i_d^* 与电压外环控制有关; 电压跌落 90% 以下时, i_d^* 与低电压穿越控制切换有关。在电网电压跌落程度不深时, 系统仍处于并网控制模式, 仅需考虑电压扰动项的影响。

计及电网电压扰动作用时的电流内环控制框图如图 4 所示。

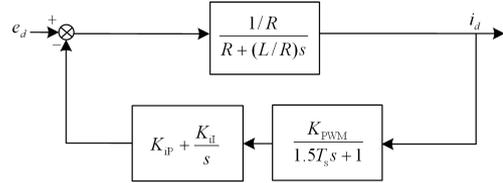


图 4 考虑 e_d 扰动时 i_d 电流内环简化控制

Fig. 4 Simplified control of current inner loop i_d with consideration of e_d disturbance

电压电压跌落瞬间, 在考虑 e_d 的扰动条件下, 电网电压跌落相当于在 e_d 输入端产生阶跃扰动 $e_d = (U_{\text{dN}} - U_{\text{df}})/s$, 其中 U_{dN} 为额定运行时电网电压 d 轴分量幅值, U_{df} 为电压跌落后电网电压 d 轴分量的幅值, 在 e_d 电压跌落的扰动作用下 d 轴输出电流变化量为^[29-33]

$$\Delta i_{d2}(s) = \frac{U_{\text{dN}} - U_{\text{df}}}{s} \cdot \frac{\tau_1 s (1.5T_s s + 1)}{K_{\text{ip}}(\tau_1 s + 1) K_{\text{pwm}}} \cdot \frac{1}{1 + 3T_s s} \quad (16)$$

将式(16)简化后, 利用部分分式法分解, 求拉式反变换, 得到阶跃扰动时输出电流变化量时域表达式。

$$\Delta i_{d2}(t) = \frac{2(U_{\text{dN}} - U_{\text{df}})m}{R(2m^2 - 2m + 1)} [(1-m)e^{-t/(3T_s)} - (1-m)e^{-t/(3T_s)} \cos \frac{t}{3T_s} + me^{-t/(3T_s)} \sin \frac{t}{3T_s}] \quad (17)$$

式(17)中, m 为电流内环结构中 e_d 扰动点两边传递函数中的额定时间常数之比(逆变器和 LCL 滤波器), 即 $m = 1.5T_s / \tau_i$ ($\tau_i = L/R$), 显然 $\tau_i = L/R > 1.5T_s$, m 小于 1, 在故障瞬间, $\Delta i_{d2}(t)$ 是一个很大的数, 相当于电网电压跌落瞬间在 d 轴电流内环中引入一个较大的直流波动分量 Δi_{d2} 。只计及内环控制的影响时, d 轴短路暂态电流可表示为 $i_{d1} = i_{d0}^* + \Delta i_{d2}$ 。

由 2.1.2 节, 并网电压中含有二次谐波分量, 根据瞬时功率理论^[29] $P_g = 1.5(u_{gd} \cdot i_{d1} + u_{gq} \cdot i_{q1})$, 基于电网电压定向 $u_{gq} = 0$, 结合式(15)、式(17)则光伏并网系统的输出功率为

$$P_g = 1.5u_{gd} \cdot i_{d1} = 1.5(U_1 e^{j\theta_1} + U_2 e^{j\theta_2} e^{j\omega t})(i_d + \Delta i_{d2}) = 1.5[U_1 i_d e^{j\theta_1} + U_1 \Delta i_{d2} e^{j\theta_1} + (U_2 i_d e^{j\omega t} e^{j\theta_2} + U_2 \Delta i_{d2} e^{j\omega t} e^{j\theta_2})] \quad (18)$$

由式(17)、式(18), 电网电压突然跌落在 d 轴电流内环产生一个直流扰动分量 Δi_{d2} , 其在电网电压含有谐波分量条件下会引发有功功率的基频波动, 进而在直流电压中引入基频波动分量, 同样会在静止坐标系下电流中引入二次谐波分量。

综上, 并网控制条件下, 逆变器输出直流电流分量引入电压外环控制使得并网电流中含有二次谐波分量; 电流中所含二次谐波分量引起并网电压中含有相应的二次谐波分量; 电网电压的跌落引入电流内环控制, 使得 d 轴内环电流产生直流扰动分量 Δi_{d2} , 扰动分量 Δi_{d2} 在与电网电压二次谐波共同作用, 在并网电流中进一步产生二次谐波分量。

2.2 低电压穿越控制对短路电流谐波分量的影响

为分析逆变器内环控制响应, 首先需要明确含光伏电源接入的电网低穿控制策略。根据国家电网关于光伏电站接入电网并网准则, 要求大中型电站在电压跌落期间提供一定的无功功率支撑。本文采用文献[18]所提控制策略, 光伏发电系统的控制器检测到并网正序电压 $U_{r(1)}$ 跌落至 90% 以下时, 控制器将切换至 LVRT 控制, 其中 d 、 q 轴电流内环参考值 i_d^* 、 i_q^* 根据电网电压跌落程度自适应给定如下:

$$i_q^* = \begin{cases} 0, & U_{r(1)} > 0.9 \\ 2(1 - U_{r(1)}), & 0.4 \leq U_{r(1)} \leq 0.9 \\ 1.2, & U_{r(1)} < 0.4 \end{cases} \quad (19)$$

在满足无功支撑并维持系统有功功率平衡基础上, 同时为防止电流过大危及逆变器安全运行, 通常要求流过逆变器电流不超过 1.2 倍的额定电流 I_N , 即 $i_d^* = \min(P_{\text{ref0}} / U_{r(1)}, \sqrt{(1.2I_N)^2 - (i_q^*)^2})$, 式中 P_{ref0} 状态下逆变器的额定输出功率。

为简化分析暂不考虑 e_d 的扰动, 得简化的电流内环控制框图如图 5 所示。

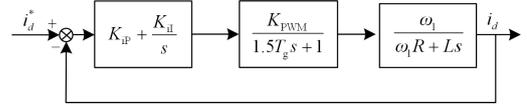


图 5 无 e_d 扰动时 i_d 电流内环简化控制

Fig. 5 Simplified control of i_d current inner loop without e_d disturbance

由图 5 可得电流内环 d 轴传递函数^[29]为

$$W_i(s) = \frac{1}{1 + \frac{R\tau_i}{K_{ip}K_{PWM}}s + \frac{1.5T_s R\tau_i}{K_{ip}K_{PWM}}s^2} \quad (20)$$

当开关频率足够高, 即 T_s 足够小时, 由于 s^2 系数远远小于 s 项系数, s^2 项可以忽略, $W_i(s)$ 可以简化为

$$W_i(s) \approx \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \quad (21)$$

式中, $\omega_c = 1/3T_s$ 。

假设电网电压跌落前有功电流指令为 i_{d0}^* , 根据电压跌落程度结合低电压穿越控制策略计算电压跌落后的有功电流指令为 i_{d1}^* , 此时, 由逆变器输出的 d 轴故障分量频域表达式^[18]为

$$\Delta i_{d3}(s) = W_i(s)(i_{d0}^* - i_{d1}^*) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \frac{i_{d0}^* - i_{d1}^*}{s} = (i_{d0}^* - i_{d1}^*) \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \omega_c} \right) \quad (22)$$

对式(22)取反拉式变换, 可得

$$\Delta i_{d3}(t) = (i_{d0}^* - i_{d1}^*)(1 - e^{-\omega_c t}) \quad (23)$$

由式(23)可知, 由于低电压穿越控制条件下电流内环参考电流的切换会在电流内环 d 轴电流中引入谐波扰动分量。由于 dq 轴独立解耦控制, 由第 1 节可知此 d 轴电流的谐波分量经派克反变换在交流侧产生电流谐波扰动分量, 同时电压扰动项 e_d 仍存在, 交流侧输出谐波成分更为复杂。

综上, 在电网故障期间, 光伏电源存在 2 种控制模式^[19], 即并网控制模式和低电压穿越控制模式。1) 故障初期, 系统仍处于并网控制模式。此时电压外环未断开, 直流分量引入逆变器控制环节在交流侧电流中产生二次谐波分量 i_{gh} ; 在内环控制部分, 电网电压跌落瞬间在电流内环控制中引入电压阶跃信号, 在 d 轴电流中产生直流扰动分量 Δi_{d2} ,

Δi_{d2} 在与并网电压谐波分量共同作用下会引发新的并网电流中的二次谐波分量；2) 检测到并网正序电压跌落至 90% 以下时，系统切换为低电压穿越控制，电流参考值的切换在内环 d 轴控制中引入电流阶跃信号使内环控制环节产生扰动分量 Δi_{d3} ，同时电网电压跌落在 d 轴产生直流扰动分量，在计及 d 轴两种扰动量 Δi_{d2} 和 Δi_{d3} 时，逆变器交流侧输出电流谐波分量更为复杂。

3 光伏并网系统故障暂态谐波特性对变压器差动保护的影响

3.1 光伏电源暂态短路电流对变压器保护的影响

差动保护因动作速度快和灵敏度高、各侧电气量同步测量方便被广泛应用为变压器的主保护。区别于输电线的差动保护，变压器差动保护为正确区分变压器励磁涌流和故障电流，防止变压器因励磁涌流的影响造成保护误动作，在配置基频电流保护的同时配置谐波保护^[28]。光伏并网发电系统暂态短路电流特性复杂，并网短路电流含有二次谐波分量的占比可能超过变压器二次谐波制动整定范围，造成二次制动元件误动作，需要对光伏电源近区的变压器差动保护性能可靠性进行分析研究。

变压器差动保护以基尔霍夫电流定律为依据，动作的正确性建立在变压器铁芯未发生饱和的基础上，其动作方程为

$$I_k = |I'_1 + I'_2| \geq I_{set} \quad (24)$$

式中： I'_1 、 I'_2 为变压器原、副边的电流互感器测量电流； I_{set} 为差动保护的动作电流。正常运行或外部故障时，变压器铁芯不会饱和，差动电流接近于 0；内部故障情况下，差动电流反映了故障点的短路电流，当差动电流大于整定值 I_{set} 时，差动保护迅速动作切除故障。

在变压器空载合闸、外部故障切除等工况下，由于变压器铁芯的非线性磁化特性，铁芯出现严重饱和，将产生很大的励磁电流，该励磁电流完全构成差动保护的动作量，可能导致差动保护误动。工程中普遍采用二次谐波制动原理识别励磁涌流。差动保护中一般配置二次谐波闭锁元件，当差动电流中的二次谐波分量满足 $I_{h2} \geq K_2 I_{n1}$ 时（其中 I_{n1} 、 I_{h2} 分别为差动电流中的基波分量和二次谐波分量的幅值），短时闭锁差动保护，防止励磁涌流造成差动保护误动， K_2 为二次谐波制动比，通常取 0.15~0.2^[34]。

3.2 仿真验证

3.2.1 光伏并网系统仿真模型搭建

本文基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建如图 6

所示的含光伏电源并网的电磁暂态仿真模型。

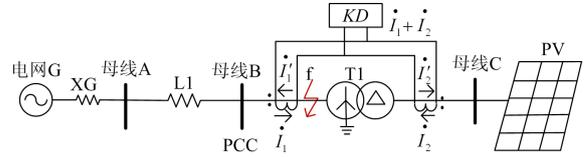


图 6 含光伏电源接入的系统仿真模型

Fig. 6 System simulation model including photovoltaic power supply access

光伏并网容量为 100 MW，接于电压等级为 10 kV 的母线 C 处。线路 L1 单位长度参数为： $r_{(1)} = r_{(2)} = 0.173 \Omega/\text{km}$ ， $x_{(1)} = x_{(2)} = 0.313 \Omega/\text{km}$ ， $r_{(0)} = 0.29 \Omega/\text{km}$ ， $x_{(0)} = 0.48 \Omega/\text{km}$ ，长度为 20 km。变压器 T_1 的容量为 150 MVA，变比为 10 kV/110 kV。电源 G 等值阻抗 $X_G = 1.6 + j10 \Omega$ 。

故障位置 f 设置升压变压器高压侧出口处(如图 6 所示)。t=3 s 时，f 处发生三相短路，受短路点过渡电阻影响，光伏系统并网点处电压跌落至 30%，并网点 PCC 处的电压如图 7 所示。

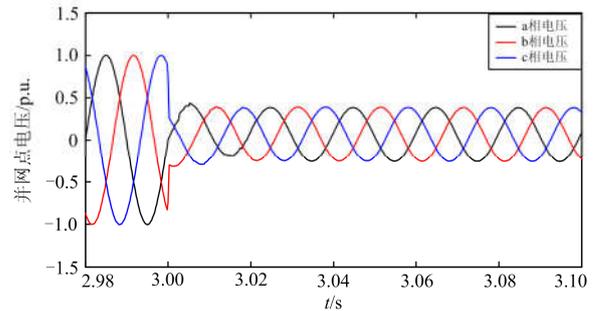


图 7 光伏发电系统并网点电压

Fig. 7 Photovoltaic grid-connected system and grid point voltage

变压器 T_1 低压侧(光伏系统侧)电流如图 8 所示。

对图 8 所示光伏侧电流采用 FFT 算法提取基频分量及二次谐波分量电流，如图 9 所示。

根据第 2 节分析，三相短路故障瞬间，由于短路电流中的直流衰减分量和电网电压的跌落，引起内环 d 轴电流中产生扰动分量，经逆变器控制环节，在三相短路电流中产生二次谐波分量。另外，由于系统检测到电压跌落到 90% 以下进行控制策略的切换，在经过 1~2 个工频周期后在新的内环电流参考值下趋于稳定，如图 8 所示。对图 8 所示光伏侧电流采用 FFT 算法提取基频分量及二次谐波分量电流如图 9 所示，由图 9 可知故障初期光伏侧短路电流中二次谐波相对基频分量的比例远超 15%，验证了理论分析的正确性。

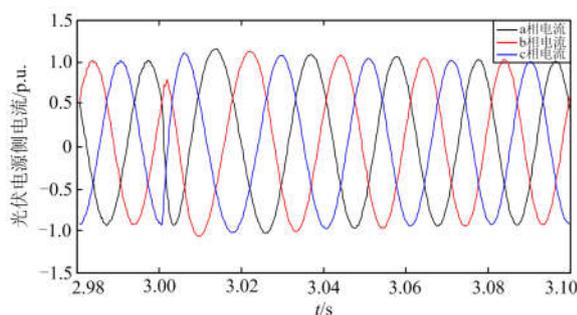


图 8 光伏电源侧电流

Fig. 8 Photovoltaic power supply side current

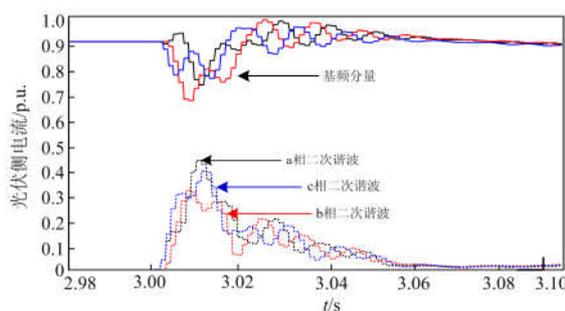


图 9 光伏侧电流基频及二次谐波分量

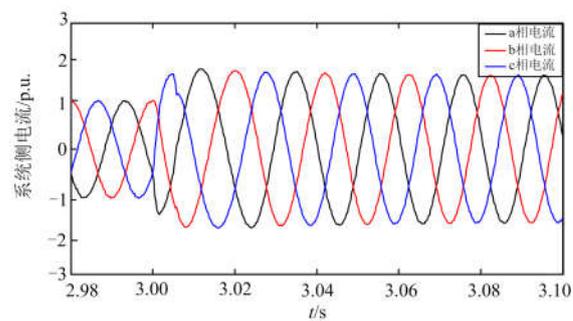
Fig. 9 Fundamental frequency and second harmonic components of current at grid-connected point of photovoltaic

3.2.2 短路电流二次谐波对变压器保护的影响验证

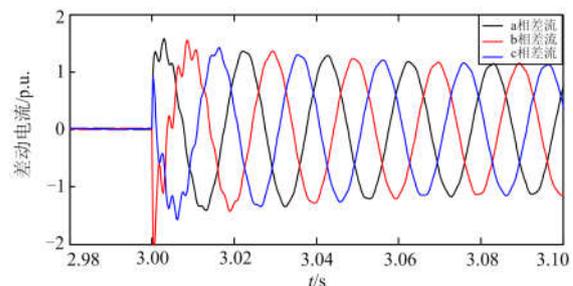
光伏电站接入电网的场景下,当系统侧提供的故障电流远大于光伏电站提供的故障电流时,即使光伏电站所提供的短路电流中 2 次谐波含量在光伏侧提供的短路电流基频中占比较大,但在总的故障电流中的占比仍然较小,对变压器保护影响较小。当光伏电站接入弱电网时,由于弱电网的等值系统阻抗较大,其提供的短路电流较小,此时在光伏侧主变出口故障时,光伏侧提供的短路电流在故障总电流中的占比增大,因此,差动电流中的二次谐波分量增大,可能会影响变压器差动保护性能。本文通过改变系统等值阻抗的方式模拟弱电网接入。

采用图 6 所示仿真模型,升压变压器高压侧出口处 f 点发生三相短路故障时,变压器高压侧(系统侧)提供的短路电流及流过变压器的差动电流如图 10 所示。

当升压变压器区内发生故障时,升压变压器的差动电流如图 10(b)所示。对图 10(b)所示差动电流使用 FFT 算法提取二次谐波,差动电流中各相电流中二次谐波分量相对于基波分量的占比如图 11 所示。其中,故障后第 1 个周波内二次谐波分量急剧增大,是由于 FFT 的暂态响应所引起。



(a) 系统侧电流



(b) 变压器差动电流

图 10 三相短路故障时系统侧短路电流及变压器差动电流

Fig. 10 Short circuit current of system side and differential current of transformer in three-phase short circuit fault

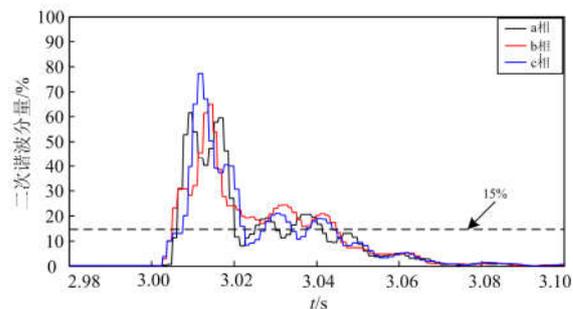


图 11 变压器差动电流中二次谐波百分比

Fig. 11 Percentage of second harmonic component in transformer differential current

由图 11 可见,故障后第 2 个工频周波开始, b 相差流的二次谐波含量超过二次谐波闭锁的整定值 $k_2(15\%)$,其持续时间约 1 个工频周波,导致变压器差动保护无法快速切除内部故障。

为模拟弱电网接入场景,本文采用光伏并网系统短路容量比(SCR)分析不同并网条件下光伏系统短路电流二次谐波分量对变压器保护的影响。光伏并网系统 SCR 是指短路容量(短路点三相短路电流 I_f 与系统额定电压的乘积)与光伏并入电网的额定容量 S_{pv} 的比值,它通常作为区分电网强弱的标志,即

$$SCR = \frac{\sqrt{3}U_N I_f}{S_{pv}} \quad (25)$$

设置光伏并网系统经不同阻抗并网，主变高压侧出口处发生三相短路故障(并网点 PCC 处电压降落至 30%)时，变压器差动电流中二次谐波分量占基频分量的百分比如表 1 所示。

表 1 不同短路容量比下差动电流二次谐波百分比

Table 1 Second harmonic percentage of differential current under different short circuit capacity ratio

短路容量比	二次谐波/%		
	a 相	b 相	c 相
3	3.54	4.26	4.98
2.8	12.56	7.83	10.23
2.4	8.45	16.87*	11.53
2.2	12.29	17.58*	18.73*
2	13.27	20.56*	18.69*
1.8	15.31*	24.73*	17.45*

表中标记“*”数据为差动电流二次谐波含量越限。由表 1 可知，随着短路容量比 SCR 的减小，系统侧提供的短路电流减小，光伏侧提供的短路电流中二次谐波含量在总故障电流中的占比增大。当光伏并网系统短路容量比小于 2.4 时，将会出现变压器某一相或二相差动电流的二次谐波分量与基波分量的比值超过 15%，从而导致变压器差动保护区内故障拒动，严重威胁变压器差动保护的可靠性。

4 结论

针对光伏并网系统故障暂态电流二次谐波对变压器保护的影响问题，本文首先详细阐述了光伏电站故障暂态电流中的二次谐波分量产生机理，在此基础上分析了二次谐波分量对变压器差动保护的影响，所得主要结论如下：

1) 光伏并网系统短路电流中的衰减直流分量通过逆变器电压外环控制在并网短路电流中产生二次谐波分量；

2) 电网电压跌落和低穿控制下电流参考值的切换引入逆变器内环控制，导致并网短路电流中的二次谐波分量进一步增大；

3) 光伏电站接入弱电网条件下，当升压变压器内部发生故障时，光伏电源提供的短路电流中可能含有较大二次谐波分量，进而使得差动电流中的二次谐波含量超过整定值，差动保护存在拒动的风险。

参考文献

[1] 李响, 范建业, 曹丽璐, 等. 大型光伏电站并网适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 164-169.

- LI Xiang, FAN Jianye, CAO Lili, et al. Analysis of grid-connected adaptability of large-scale photovoltaic power stations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 164-169.
- [2] 靳现林, 赵迎春, 吴刚. 考虑分布式光伏和电动汽车接入的配电网空间负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 10-19.
- JIN Xianlin, ZHAO Yingchun, WU Gang. Spatial load forecasting method for distribution network considering distributed PV and electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 10-19.
- [3] 王书征, 李先允, 许峰. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.
- WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride through control of cascaded photovoltaic grid-connected inverter under asymmetric grid failure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [4] 田野. 大型光伏电站并网对配电网影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- TIAN Ye. Study on the influence of large-scale photovoltaic power plants grid-connected to distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [5] 焦彦军, 梁宵, 蒋晨阳. 计及 LVRT 光伏电站并网下方向元件动作区域计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 20-24.
- JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Directional element action area calculation considering LVRT of grid-connected PV plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 20-24.
- [6] DOYLE M T. Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection[C] // Power Engineering Society Summer Meeting, July 21-25, 2002, Chicago, IL, USA: 103-105.
- [7] 李召兄, 吴丽, 吴兴全, 等. 含光伏电站的并网系统线路故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 104-108.
- LI Zhaoxiong, WU Li, WU Xingquan, et al. Research on fault location of grid-connected system with photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 104-108.
- [8] 冯爱成, 王宝华, 单馨. 含光伏电源配电网的自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 141-147.
- FENG Aicheng, WANG Baohua, SHAN Xin. Adaptive distance protection with photovoltaic power distribution

- network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 141-147.
- [9] YAZDANI D, MOJIRI M, BAKHSHAI A, et al. A fast and accurate synchronization technique for extraction of symmetrical components[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(3): 674-684.
- [10] REZA M S, CIOBOTARU M, AGELIDIS V G. Grid voltage offset and harmonics rejection using second order generalized integrator and Kalman filter technique[C] // *Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, June 2-5, 2012, Harbin, China: 104-111.
- [11] INFIELD D G, ONIONS P, SIMMONS A D, et al. Power quality from multiple grid-connected single-phase inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(4): 1983-1989.
- [12] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(1): 263-272.
- [13] KONISHI H, IWATO T, KUDOU M. Development of large-scale power conditioning system in Hokuto mega-solar project[C] // *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA*, June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 1975-1979.
- [14] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1620-1629.
- [15] NAM S, PARK J, KANG S, et al. Phasor estimation in the presence of DC offset and CT saturation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(4): 1842-1849.
- [16] 孔祥平, 袁宇波, 黄浩声, 等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2444-2449.
- KONG Xiangping, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Transient characteristics of photovoltaic power supply fault current and its influencing factors[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [17] 文珊, 陈兵. 分布式光伏逆变器并网侧短路暂态特性分析[J]. *江苏电机工程*, 2014, 33(6): 34-37.
- WEN Shan, CHEN Bing. Analysis on transient characteristics of the distributed photovoltaic inverter in the grid side short-circuit[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2014, 33(6): 34-37.
- [18] 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. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- [19] 毕天姝, 刘素梅, 杨奇逊, 等. 逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(13): 165-171.
- BI Tianshu, LIU Sumei, YANG Qixun, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(13): 165-171.
- [20] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规范: Q/GDW 617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- State Grid Corporation of China. Photovoltaic power station access to grid technical specifications: Q/GDW 617—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [21] 王国宁, 杜雄, 邹小明, 等. 用于三相并网逆变器稳定性析的自导纳和伴随导纳建模[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 3973-3981, 4275.
- WANG Guoning, DU Xiong, ZOU Xiaoming, et al. Self and accompanying admittance model for three-phase grid-tied inverter stability analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14): 3973-3981, 4275.
- [22] SHENG W X, LIU K Y, LIU Y, et al. Optimal placement and sizing of distributed generation via an improved nondominated sorting genetic algorithm II[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 569-578.
- [23] HAN Jiexiang, KONG Xiangping, LI Peng, et al. A novel low voltage ride through strategy for cascaded power electronic transformer[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 227-238. DOI: 10.1186/s41601-019-0137-1.
- [24] 周湘杰, 袁小芳, 阳领. 光伏电站自适应光伏支架设计及仿真分析[J]. *热力发电*, 2020, 49(6): 84-89.
- ZHOU Xiangjie, YUAN Xiaofang, YANG Ling. Design and simulation analysis of self-adaptive photovoltaic support for photovoltaic power station[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(6): 84-89.
- [25] TAFTI H D, MASWOOD A I, KONSTANTINOU G, et al. A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(5): 4088-4101.
- [26] 肖繁, 张哲, 尹项根, 等. 双馈电源接入对变压器差动保护的影响机理分析[J]. *浙江电力*, 2018, 37(12): 45-51.
- XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Influence mechanism analysis of doubly fed induction generator access on differential protection of transformer[J]. *Zhejiang*

- Electric Power, 2018, 37(12): 45-51.
- [27] 张兴. PWM整流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
ZHANG Xing. PWM rectifier and its control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [28] 王丽, 刘会金, 王陈. 瞬时无功功率理论的研究综述[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 98-100, 103.
WANG Li, LIU Huijin, WANG Chen. A review of research on instantaneous reactive power theory[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 98-100, 103.
- [29] 刘力, 于佳丽. 不对称电网电压下光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2848-2856.
LIU Li, YU Jiali. Research of control strategy of grid connected PV inverter under asymmetric grid voltage[J]. Journal of Solar Energy, 2017, 38(10): 2848-2856.
- [30] 陈宏, 冷华, 唐海国, 等. 含可再生能源的微电网经济运行双层优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 93-98.
CHEN Hong, LENG Hua, TANG Haiguo, et al. Double-layer optimization method for economic operation of microgrids containing renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 93-98.
- [31] 和萍, 武欣欣, 陈婕, 等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 20-27.
HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of integrated energy systems including wind power and photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 20-27.
- [32] 唐程辉, 张凡, 梁才, 等. 考虑电池损耗和分布式可再生能源的储能调度[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 1-6.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, LIANG Cai, et al. Energy storage scheduling considering battery loss and distributed renewable energy[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 1-6.
- [33] 刘全, 王飞, 严星, 等. 含分布式光伏电源的配电网故障分析与研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(8): 79-83.
LIU Quan, WANG Fei, YAN Xing, et al. Fault analysis and research of distribution network with distributed photovoltaic power[J]. Smart Power, 2018, 46(8): 79-83.
- [34] 唐菊生. 基于二次谐波制动的变压器差动保护的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
TANG Jusheng. Research on transformer differential protection based on second harmonic braking[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.

收稿日期: 2019-08-13; 修回日期: 2019-11-14

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao_sf@126.com

黄予园(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电及并网保护; E-mail: 710229833@qq.com

李菁(1989—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为风电接入电力系统的保护与控制。E-mail: lijing_ncepu@163.com

(编辑 葛艳娜)