

考虑光伏并网控制作用融合倍频谐波信息的 配电网线路差动保护方案

籍宏震, 王媛媛*, 叶宇轩, 尹有鹏, 曹成军, 方琦淋

(长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 湖南省 长沙市 410114)

Differential Protection Scheme for Distribution Lines Considering the Role of Photovoltaic Grid-connected Control With Integrated Multiple Harmonic Information

JI Hongzhen, WANG Yuanyuan*, YE Yuxuan, YIN Youpeng, CAO Chengjun, FANG Qilin

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan Province, China)

ABSTRACT: To mitigate the impact of photovoltaic (PV) control strategies on the protection of distribution network lines, this paper proposes a novel differential protection scheme based on fault component current amplitude, phase, and harmonic content information. When a short-circuit fault occurs in the distribution network, the response patterns of the inner and outer loop control signals of the PV grid-connection to different fault types and transition resistance levels are analyzed. Furthermore, by incorporating the control effects of the proportional-integral (PI) within the converter, analytical expressions for the fundamental wave and the second and third harmonic components of the fault current in the PV output are derived, and an equivalent model of the PV with parallel output from multi-frequency current sources is constructed. By synthesizing various fault component information, under low transition resistance, protection criteria are established using the amplitude-phase characteristics of the fundamental frequency of the fault component. Under high transition resistance, the protection's ability to withstand transition resistance is enhanced by integrating the second and third harmonic content of the fault component, ultimately achieving an integration of PV control characteristics and differential protection scheme design. A simulation model is constructed in Matlab for verification, and the results demonstrate that the protection scheme can adapt to various fault scenarios and possesses strong tolerance to transition resistance.

KEY WORDS: distribution network faults; grid-connected photovoltaic systems; fundamental and second and third harmonic fault components; differential current protection

摘要: 为改善光伏控制策略对配电网线路保护的影响,提出一种基于故障分量电流幅值、相位和谐波含量信息的新型差动保护方案。配电网发生短路故障时,针对故障的不同类型和过渡电阻大小,分析光伏并网内外环控制信号的响应规律,进一步结合变流器比例-积分环节的控制作用,推导光伏输出电流故障分量的基波和2、3次谐波解析表达式,构建多频段电流源并联输出的光伏等效模型;综合多种故障分量信息,在低过渡电阻下利用故障分量基波的幅值-相位特征构建保护判据,在高过渡电阻下再融合故障分量的2、3次谐波含量信息提高保护的抗过渡电阻能力,最终实现光伏控制特性和差动保护方案设计的融合。在Matlab中搭建仿真模型进行验证,结果表明,保护方案能够适应不同故障场景,且具有耐受过渡电阻能力强的特点。

关键词: 配电网故障; 光伏并网系统; 基波与2、3次谐波故障分量; 电流差动保护

0 引言

“双碳”战略下,光伏发电备受瞩目。光伏通过变流器接入交流电网,电网发生故障时,受变流器控制特性的影响,光伏输出电流会对电网继电保护产生影响,导致常规电流保护无法满足光伏接入配电网场景下的需求。研究适用于有源配电网的新型保护原理,有利于光伏电源的广泛接入,为双碳目标提供重要的理论支撑。

针对上述问题,国内外学者首先对光伏等效模型的建立开展了大量研究工作。文献[1]率先考虑并网控制策略的影响,构建了配电网故障后光伏等效模型,但模型中尚未考虑到并网规定的要求:“配电网故障后,光伏低电压穿越期间优先输出无功功

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177069)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177069).

率支撑系统电压”。文献[2]通过理想电压源与变化内阻抗串联的形式反映控制策略对光伏输出电流的影响,然而在工程实际中电流型的并网控制方式更加普遍。因此,针对电流型控制方式的特点,文献[3]利用光伏电源输出无功电流大小与并网点(point of common coupling, PCC)电压跌落量的线性关系,提出将光伏输出特性等值为受并网点电压控制的电流源模型。

在上述光伏等效模型研究的基础上,学者将光伏并网控制策略与继电保护判据相结合。文献[4]建立了逆变类分布式电源的故障分析数学模型,并设计了相应保护判据,但文中所采用的 PQ 并网控制策略在电网发生不对称故障时,往往由于锁相环无法提供准确电网相位导致光伏电源面临大面积脱网的风险。文献[5]采用电流幅值构造保护判据,但对分布式电源容量有一定限制。文献[6]利用电压电流的相角识别故障,该方法对配网系统通信通道具有比较高的要求。文献[7-9]在文献[5-6]的基础上,提出综合利用差动保护检测点的电压电流幅值和相位关系识别故障,但在某些故障微弱的不利条件下会出现保护拒动问题。

为进一步提高保护可靠性,针对不同故障类型的差异,学者们开始研究与之适配的保护方式。文献[10]分析了并网控制策略影响下配电网发生三相短路故障光伏输出电流的谐波特性及其对继电保护的影响。文献[11-13]针对文献[10]之外的故障类型开展研究,探讨了配电网发生不对称故障时光伏变流器输出电流谐波特性及其对保护的影响。文献[12]在上述研究的基础上推导了变流器控制作用下的光伏输出电流解析表达,总结说明了光伏输出电流规律很大程度上受到变流器控制特性的影响,具有异于同步发电机的暂态运行特性。

上述方法在理论和技术方面为光伏电源并网的可靠运行奠定了基础。但受光伏电源自身出力不确定性、并网控制方案复杂性和电网故障类型多样性的影响,目前保护策略仍存在如下问题^[14-16]: 1) 现有光伏模型中,忽略了故障发展不同阶段并网控制方案对光伏等效模型的影响; 2) 保护判据仅适用于某些特定的电网短路类型; 3) 受光伏控制策略的影响,在某些过渡电阻较大的情况,保护拒动风险高。因此,有必要针对上述问题进一步开展研究。

本文首先研究光伏正序 PQ 并网控制、低电压

穿越控制、变流器输出限流控制 3 种策略在故障发展不同阶段对光伏电源输出电流的影响,推导了控制影响下光伏输出电流基波与 2、3 次谐波分量解析表达式,构建多个频段电流源并联输出的光伏等效模型;其次,针对故障的不同类型(区内外故障、区内对称故障、区内不对称故障等)和不同位置(故障距离、过渡电阻),分析光伏的电压、电流、功率输出特性,从数学上定量分析配网系统故障后差动保护检测点正序故障分量电流基波与 2、3 次谐波的电气信息;最后,利用并网控制作用下产生的多类故障分量信息,提出一种新型差动保护方案,利用 Matlab 搭建光伏并网系统模型,验证所提方案的有效性,解决光伏输出受控特性导致保护失效的问题。

1 光伏电源的输出特性分析

1.1 光伏电源输出特性的影响因素

光伏输出电流受并网控制策略影响,具体体现在^[17-18]: 1) 正常运行时,光伏在正序 PQ 控制策略作用下维持光伏输出电压电流同相位,最大程度向电网提供有功功率; 2) 电网故障时,并网点电压低于 0.9 倍额定电压时触发低电压穿越控制策略,该阶段光伏主动提高无功输出以缓解并网点电压跌落程度,避免光伏大面积脱网,光伏输出功率的改变导致并网点电压和电流的幅值、相位出现时变现象,迫使现有继电保护判据面临失效的风险;此外由于变流器自身电力电子设备过电流承受能力有限,当电压进一步跌落时将触发限流控制策略,限制故障后光伏输出电流不超过额定电流的 1.2~2 倍,进一步提高了故障电流的检测难度。

为准确模拟配电网故障后光伏输出电流,本文从正序 PQ 并网控制、低电压穿越控制和变流器输出限流控制 3 个方面考虑控制策略对输出电流的影响^[19]。

1) 正序 PQ 并网控制。

光伏并网时,为简化计算,常采用电网电压定向矢量控制,将三相静止坐标系下的电压、电流信号变换到两相同步坐标系,将同步坐标系的 d 轴定向于电网电压矢量 $\dot{U}_m$, 有:

$$\begin{cases} U_d = |\dot{U}_m| = U_m \\ U_q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d 、 U_q 分别为两相同步坐标系下有功电压和

无功电压; U_m 为电网相电压幅值。

在两相同步坐标系下, 网侧变流器相对于电网的有功和无功功率分别为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(U_d I_d + U_q I_q) = \frac{3}{2} U_m I_d \\ Q = \frac{3}{2}(U_q I_d - U_d I_q) = -\frac{3}{2} U_m I_q \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_d 、 I_q 分别为两相同步坐标系下有功电流和无功电流。通过式(1)—(2)可以计算正序 PQ 并网控制下所需的控制量参考值, 实现光伏并网, 并保证电网正常运行时光伏电源单位功率因数输出。

2) 低电压穿越控制。

电网发生故障时, 根据国家电网 Q/GDW480—2021《分布式电源接入电网技术规定》要求, 光伏电源并网电压跌落小于 0.9 倍额定电压时(低电压穿越过程), 光伏仍需保持并网运行并输出一定无功功率以起到电压支撑的作用。此时光伏故障输出电流由正序 PQ 控制和低电压穿越控制共同决定, 此过程光伏电源向电网提供的有功电流 I_d 和无功电流 I_q 计算如下:

$$\begin{cases} I_d = P_{\text{ref}} / (1.5 U_{p.f}) \\ I_q = 1.5(0.9 - \gamma) I_N \quad 0.2 \text{ pu} \leq \gamma \leq 0.9 \text{ pu} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{ref} 为正常工况下光伏输入电网的有功功率参考值; $U_{p.f}$ 为故障后光伏并网点电压幅值; γ 为电

压跌落量, $\gamma = |U_{p.f} / U_{\text{ref}}|$, U_{ref} 为光伏接入点电压参考值; I_N 为光伏额定输出电流。

由式(3)可知, 故障时无功参考电流和有功参考电流均会提升, 为支撑系统电压, 会优先满足无功电流输出需求。

3) 变流器输出限流控制。

电压持续下降会导致光伏输出电流超过变流器承受能力, 即输出有功电流和无功电流之和超过额定电流的 1.2~2 倍, 需启动变流器输出限流控制, I_d 的计算由式(3)更改为

$$I_d = \sqrt{I_{\text{max}}^2 - I_q^2} \quad (4)$$

式中 I_{max} 为光伏电源最大允许通过电流。

图 1 为 Matlab 仿真 10 kW 光伏并网系统在正常运行、轻度短路故障($\gamma=0.7 \text{ pu}$)、严重短路故障($\gamma=0.3 \text{ pu}$)时的光伏电源输出情况。正常时输出如图 1(a)、(d)所示, 可见光伏电源输出保持电压、电流同相位; 电压跌落程度较弱时, 电压、电流出现相位差如图 1(b)、(e)所示, 此时仅触发低压穿越控制, 无功、有功均有上升; 电压跌落程度较强时如图 1(c)、(f)所示, 同时触发低电压穿越控制和输出限流控制, 电压、电流相位差会进一步增加, 无功上升程度增加, 有功一定程度下降, 仿真结果与本节的理论分析一致。

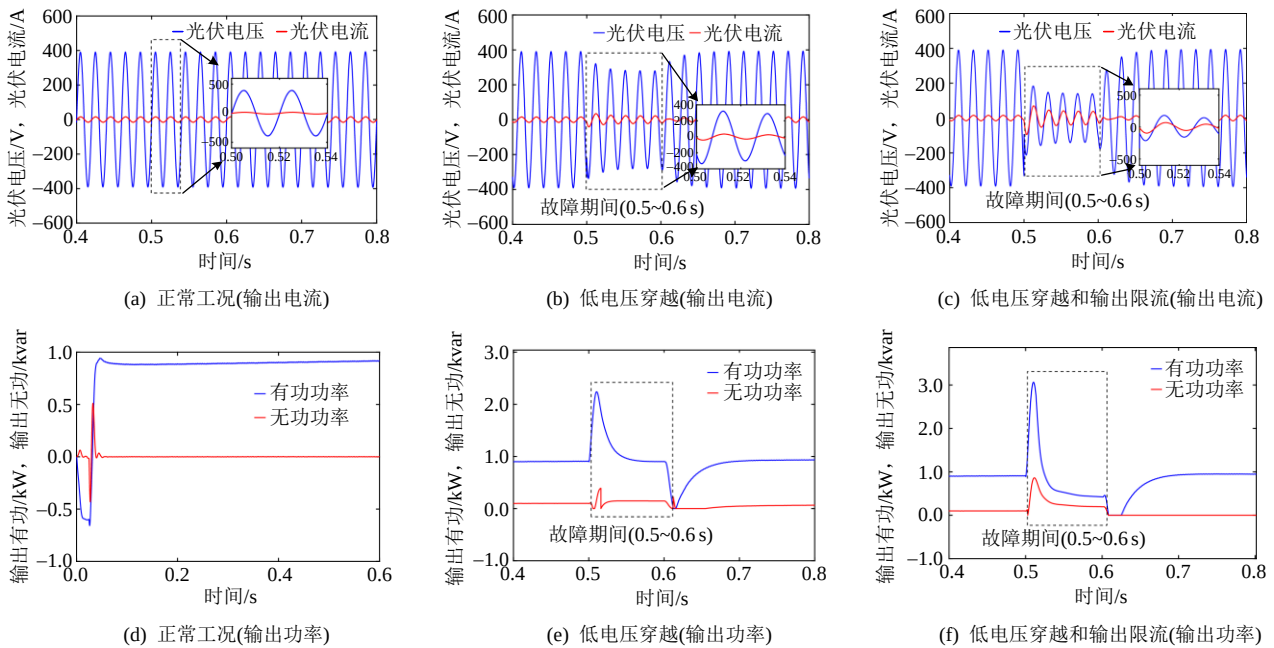


图 1 控制策略作用下光伏输出特性

Fig. 1 Photovoltaic output characteristics under the effect of control strategy

1.2 电网三相对称时光伏输出谐波特性

电网三相对称包括配电网正常运行和配电网

发生对称故障 2 种情况。

对于配电网正常运行情形, 正序控制策略能够

满足光伏并网要求。本部分着重研究配电网发生对称故障情形,故障后由于并网点电压下降,光伏输出电流显著上升,在正序 PQ 控制策略和低电压穿越控制策略共同作用下,光伏输出电流和功率的谐波输出特性与同步发电机相比有明显差异。

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,衰减速度一般为数十 ms。而电力电子器件的响应速度为 μs 级,该直流衰减分量引入控制环节,可引发谐波分量^[10,20]。

电网电压跌落瞬间,并网电压、电流相量可表示为:

$$\dot{U}_g = U_1 e^{j\phi_u} e^{j\omega_1 t} \quad (5)$$

$$\dot{I}_g = I_1 e^{j\phi_i} e^{j\omega_1 t} + I_0 e^{-t/\tau_{dc}} \quad (6)$$

式中: $U_1 = \gamma U_{\text{ref}}$ 、 $I_1 = (1/\gamma) I_N$ 、 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幅值; ϕ_u 、 ϕ_i 分别为电压、电流基频分量初始相角; τ_{dc} 为暂态直流量的衰减时间常数; ω_1 为基频角速度。

根据式(5)、(6)可计算电网侧输出有功功率:

$$P_g = 1.5 \text{Re}[\dot{U}_g \dot{I}_g^*] = 0.5[S_1 + S_1^* + (S_0 e^{j\omega_1 t} + S_0^* e^{-j\omega_1 t}) e^{-t/\tau_{dc}}] \quad (7)$$

式中: $S_1 = 1.5 U_1 \dot{I}_1^*$; $S_0 = 1.5 U_1 \dot{I}_0^*$ 。

由式(7)可知,电网电压突然跌落后,受暂态过程中故障电流直流衰减分量的影响,有功功率将出现衰减的非周期分量。

忽略逆变器的损耗,直流电容平衡方程可表示为

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{pv} - I_g = \frac{P_{pv} - P_g}{U_{dc}} \quad (8)$$

式中: C 为直流侧电容; U_{dc} 为直流侧直流母线电压; I_{pv} 为光伏电源输出电流幅值; P_{pv} 为光伏电池板输出的有功功率; 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,由式(7)、(8)可知,暂态瞬间直流分量的引入使得光伏并网系统输出的有功功率 P_g 产生基频非周期分量,此功率波动会引起直流母线电压中出现基频非周期分量。设直流母线电压的基频非周期分量为

$$\begin{cases} \Delta U_{dc} = U_{dch} \cos(\omega_1 t + \varphi_{dc}) e^{-t/\tau_{dc}} \\ U_{dch} = \frac{1}{2CU_{dc}} (S_0 + S_0^*) \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_{dch} 为直流母线电压基频非周期分量幅值; φ_{dc} 为直流母线电压基频非周期分量初始相角。

d 轴电流内环参考值由直流电压外环控制得到,旋转坐标系下直流母线电压的基频非周期分量在 d 轴电流内环中产生的基频非周期分量时域表达式为

$$\Delta \dot{I}_{d1}(t) = -\frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} (E_K U_{dch} e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{dc}} + E_K^* U_{dch}^* e^{-j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{dc}}) \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} E_K = \frac{[K_{VP}(j\omega_1 - 1/\tau_{dc}) + K_{VI}][K_{IP}(j\omega_1 - 1/\tau_{dc}) + K_{II}]}{(j\omega_1 - 1/\tau_{dc})(j\omega_1 - 1/\tau_{dc} + \zeta_1)(j\omega_1 - 1/\tau_{dc} + \zeta_2)} \\ \zeta_{1,2} = \frac{(R_m + K_{PWM} K_{IP})\omega_1 \pm \sqrt{[(R_m + K_{PWM} K_{IP})\omega_1]^2 - 4\omega_1 L_m K_{PWM} K_{II}}}{2L} \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_m 、 R_m 分别为光伏电源变流器与系统间的联络线电感和电阻; K_{VP} 、 K_{VI} 为电压外环 PI 控制器的比例和积分系数; K_{IP} 、 K_{II} 为电流内环 PI 控制器的比例和积分系数; K_{PWM} 为逆变器等效增益。

逆变器电流 d 轴分量中的基频非周期分量经派克变换后在静止坐标系下表现为 2 次谐波分量,即光伏输出电流的 2 次谐波分量表达式为

$$\Delta \dot{I}_{pv,2} = \frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} |E_K U_{dch}| e^{j(2\omega_1 t + \theta_{dc})} e^{-t/\tau_{dc}} \quad (12)$$

式中 θ_{dc} 为 $\Delta \dot{I}_{pv,2}$ 的初始相角。

Matlab 仿真容量为 10 kW 的光伏系统在不同过渡电阻下并网点电压跌落程度、光伏输出电流情况,结果如图 2—4 所示。

由图 2—4 可知,在不同的过渡电阻下光伏输出电流的有功、无功分量的幅值和比例发生不同程度的改变。进一步对输出电流进行傅里叶分析,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,发生三相短路故障(对称故障)时光伏输出电流中 2 次谐波含量明显上升,验证了本节理论分析的结论。

1.3 电网三相不对称时光伏输出谐波特性

电网发生不对称故障时,电压突变引起并网电流除基波分量外也存在一定的直流衰减分量^[11,21]。在没有零序的情况下,电网电压跌落瞬间,并网电压、电流相量可分解为正序和负序的正交和:

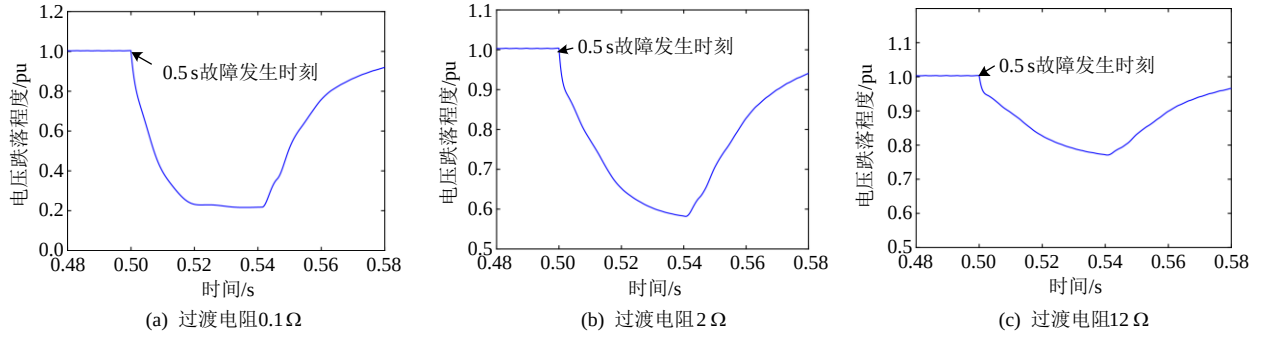


图 2 配网三相短路后电压跌落程度

Fig. 2 Voltage drop after a three-phase short circuit in the distribution network

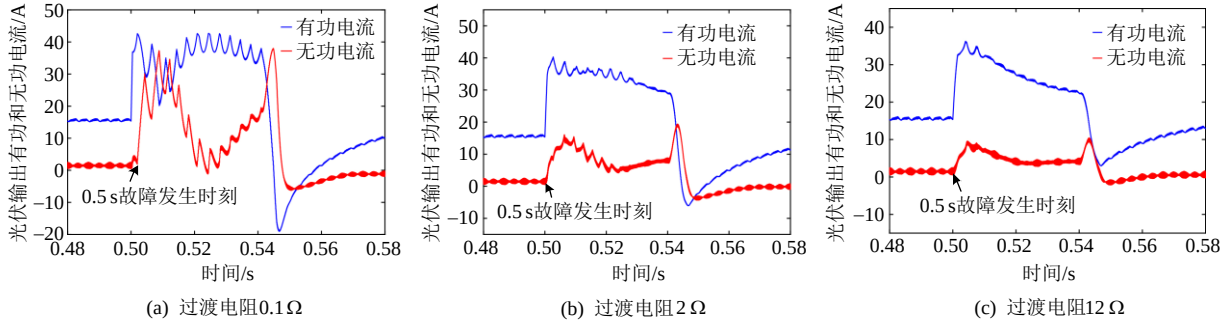


图 3 配网三相短路后光伏输出电流

Fig. 3 PV output current after three-phase short circuit in distribution network

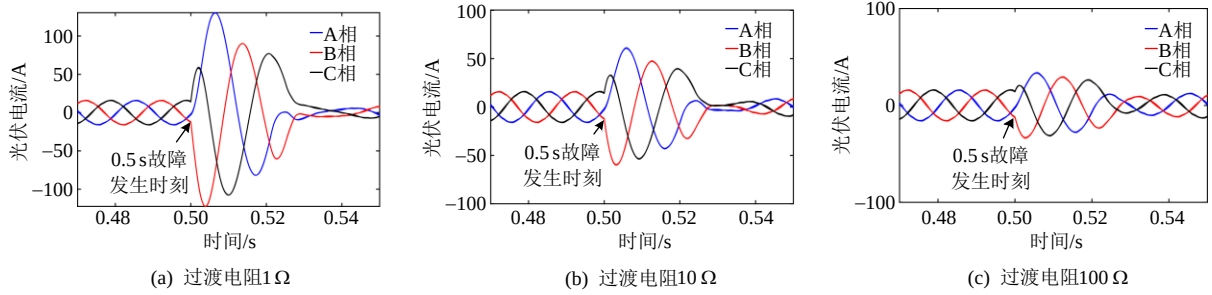


图 4 配网三相短路光伏输出电流

Fig. 4 Three-phase short circuit PV output current in distribution network

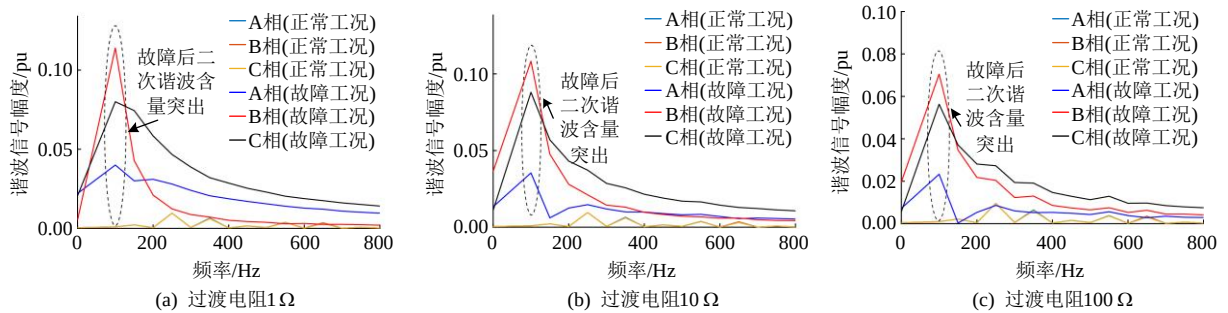


图 5 配网三相短路光伏输出电流傅里叶分析

Fig. 5 Fourier analysis of PV output current during a three-phase short circuit in the distribution network

$$\begin{cases} \dot{U}_{g2} = U_1^p e^{j\varphi_1^p} e^{j\omega_1 t} + U_1^n e^{j\varphi_1^n} e^{-j\omega_1 t} \\ \dot{I}_{g2} = I_1^p e^{j\varphi_1^p} e^{j\omega_1 t} + I_1^n e^{j\varphi_1^n} e^{-j\omega_1 t} + I_0 e^{-t/\tau_{dc}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: 上标 p 表示正序; 上标 n 表示负序。

根据式(13)在电网不对称工况时, 有功功率计算如下:

$$P_{g2} = \frac{3}{2} \text{Re}[\dot{U}_{g2} \dot{I}_{g2}^*] = \frac{1}{2} (S_1^p + S_1^{p*} + S_1^n + S_1^{n*}) + \frac{1}{2} (S_2 e^{j2\omega_1 t} + S_2^* e^{-j2\omega_1 t} + S_3 e^{-j2\omega_1 t} + S_3^* e^{j2\omega_1 t}) + [(S_0^p e^{j\omega_1 t} + S_0^{p*} e^{-j\omega_1 t}) + (S_0^n e^{-j\omega_1 t} + S_0^{n*} e^{j\omega_1 t})] \frac{1}{2} e^{-t/\tau_{dc}} \quad (14)$$

式中: $S_1^p = 1.5U_1^p \dot{I}_1^{p*}$; $S_1^n = 1.5U_1^n \dot{I}_1^{n*}$; $S_2 = 1.5U_1^p \dot{I}_1^{n*}$; $S_3 = 1.5U_1^n \dot{I}_1^{p*}$; $S_0^p = 1.5U_1^p \dot{I}_0^*$; $S_0^n = 1.5U_1^n \dot{I}_0^*$ 。由式(14)可知,配电网发生不对称故障时,电网电压突然跌落后,受不平衡电压、电流和暂态过程直流分量的影响,有功功率将出现基频和2倍频衰减的非周期分量。

根据式(8),有功功率的基频和2倍频分量会引起直流母线电压也出现基频和2倍频分量。设直流母线电压的非周期分量为:

$$\Delta U_{dc} = U_{dch_1} \cos(\omega_1 t + \phi_{dc_1}) e^{-t/\tau_{dc}} + U_{dch_2} \cos(2\omega_1 t + \phi_{dc_2}) + U_{dch_3} \cos(-2\omega_1 t + \phi_{dc_3}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} U_{dch_1} = \frac{1}{2CU_{dc}} (S_0^p + S_0^{p*} + S_0^n + S_0^{n*}) \\ U_{dch_2} = \frac{1}{2CU_{dc}} (S_2 + S_2^*) \\ U_{dch_3} = \frac{1}{2CU_{dc}} (S_3 + S_3^*) \end{cases} \quad (16)$$

在旋转坐标系下,经外环PI控制,直流母线电压的基频和2倍频分量在d轴电流内环中产生的分量时域表达式为

$$\begin{aligned} \Delta I_{d2}(t) = & -\frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} (E_k U_{dch_1} e^{j\omega_1 t} e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} + E_k^* U_{dch_1}^* e^{-j\omega_1 t} e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}}) - \\ & \frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} (E_k U_{dch_2} e^{j2\omega_1 t} + E_k^* U_{dch_2}^* e^{-j2\omega_1 t}) - \\ & \frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} (E_k U_{dch_3} e^{-j2\omega_1 t} + E_k^* U_{dch_3}^* e^{j2\omega_1 t}) \end{aligned} \quad (17)$$

逆变器电流d轴分量经派克变换在静止坐标系下产生新的波动分量,即光伏输出电流(含2次谐波和3次谐波)的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{pv_3} = & \frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} |E_k U_{dch_1}| e^{j(2\omega_1 t + \theta_{dc_1})} e^{-t/\tau_{dc}} + \\ & \frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} |E_k U_{dch_2}| e^{j(3\omega_1 t + \theta_{dc_2})} + \\ & \frac{\omega_1 K_{PWM}}{2L_m} |E_k U_{dch_3}| e^{j(-3\omega_1 t + \theta_{dc_3})} \end{aligned} \quad (18)$$

式中 θ_{dc_1} 、 θ_{dc_2} 、 θ_{dc_3} 分别为 $\Delta \dot{I}_{pv_3}$ 的2倍频分量和3倍频分量的初始相角。

根据式(14)~(18),Matlab 仿真 10kW 光伏,在不同过渡电阻、不对称故障类型下光伏并网点电压跌落程度、光伏输出电流和输出功率情况,结果如图6~13所示。

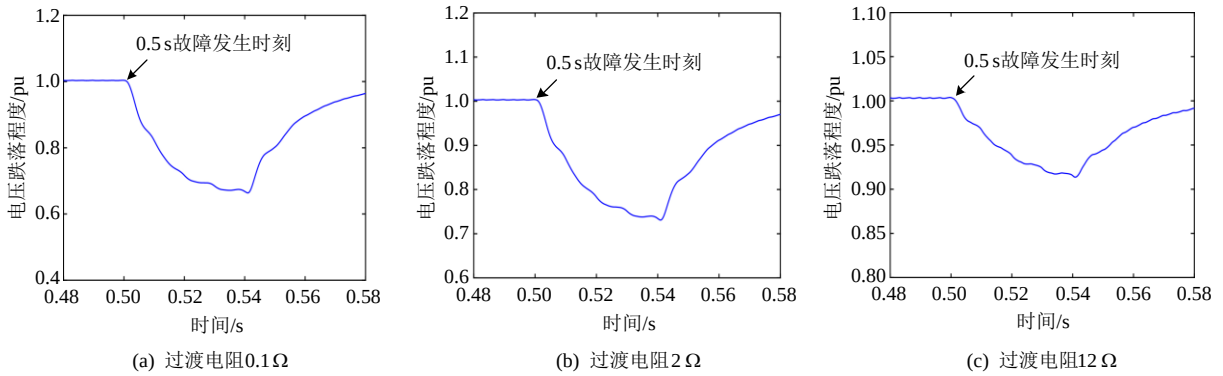


图6 配网单相接地后电压跌落程度

Fig. 6 Voltage drop after single-phase grounding in distribution network

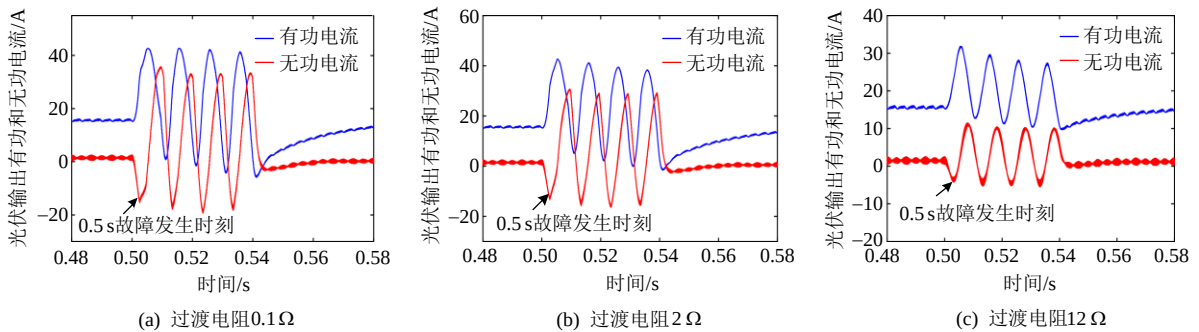


图7 配网单相接地后光伏的输出电流

Fig. 7 Output current of PV power after single-phase grounding of distribution network

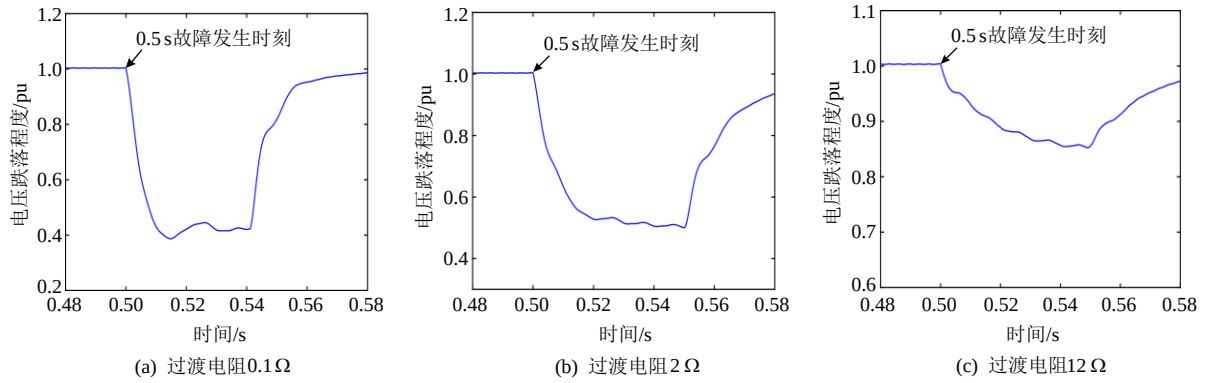


图 8 配网两相短路后电压跌落程度

Fig. 8 Voltage drop after a two-phase short circuit in the distribution network

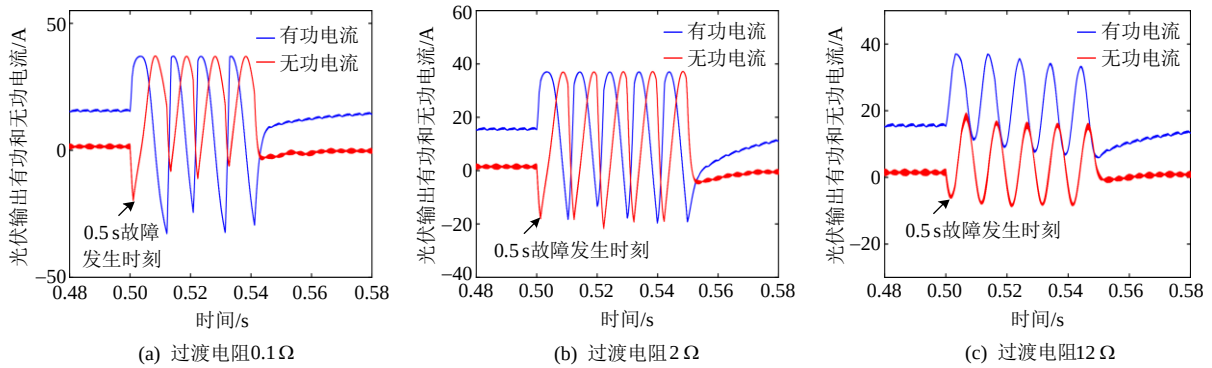


图 9 配网两相短路后光伏的输出电流

Fig. 9 Output current of PV power after a two-phase short circuit in the distribution network

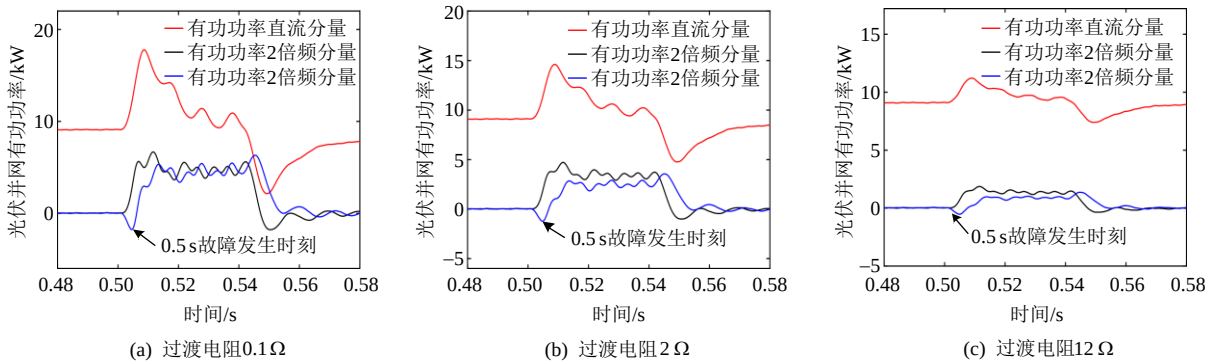


图 10 配网单相接地后光伏的并网有功功率

Fig. 10 Active power of PV grid connection after single-phase grounding of distribution network

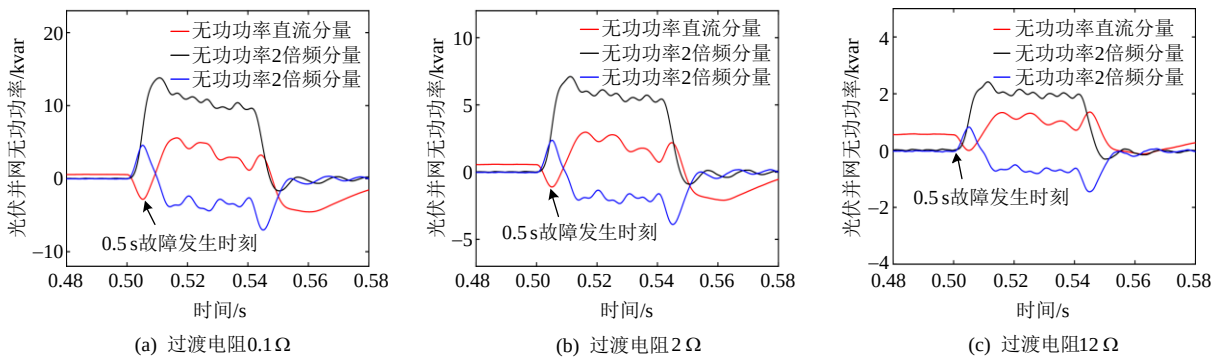


图 11 配网单相接地后光伏的并网无功功率

Fig. 11 Reactive power of PV power grid connection after single-phase grounding in distribution network

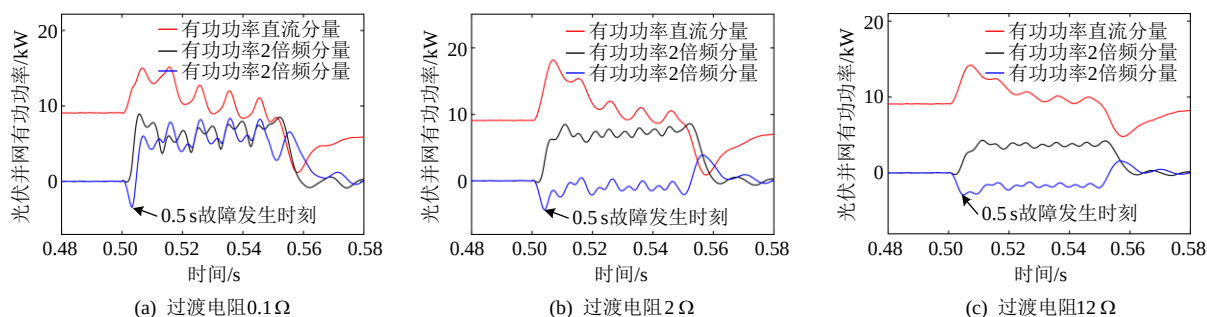


图12 配网两相短路后光伏的并网有功功率

Fig. 12 Active power of PV grid connection after two-phase short circuit in distribution network

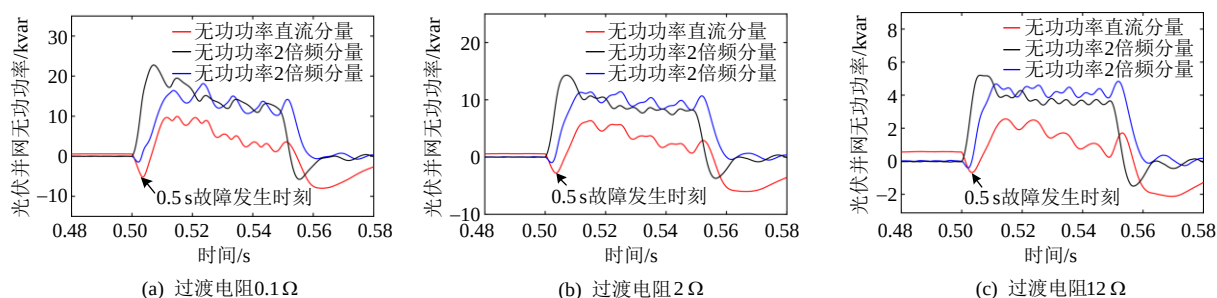


图13 配网两相短路后光伏的并网无功功率

Fig. 13 Reactive power of PV grid connection after two-phase short circuit in distribution network

由图 6—9 可见, 并网有功、无功电流出现倍频分量; 图 10、13 中, 光伏输出功率的有功、无功部分同样出现倍频分量; 受低电压穿越和变流器

限流的影响, 图 6—13 中光伏输出电流和功率的有功、无功部分的比例出现了重新分配的情况。对光伏输出电流进行傅里叶分析, 结果如图 14 所示。

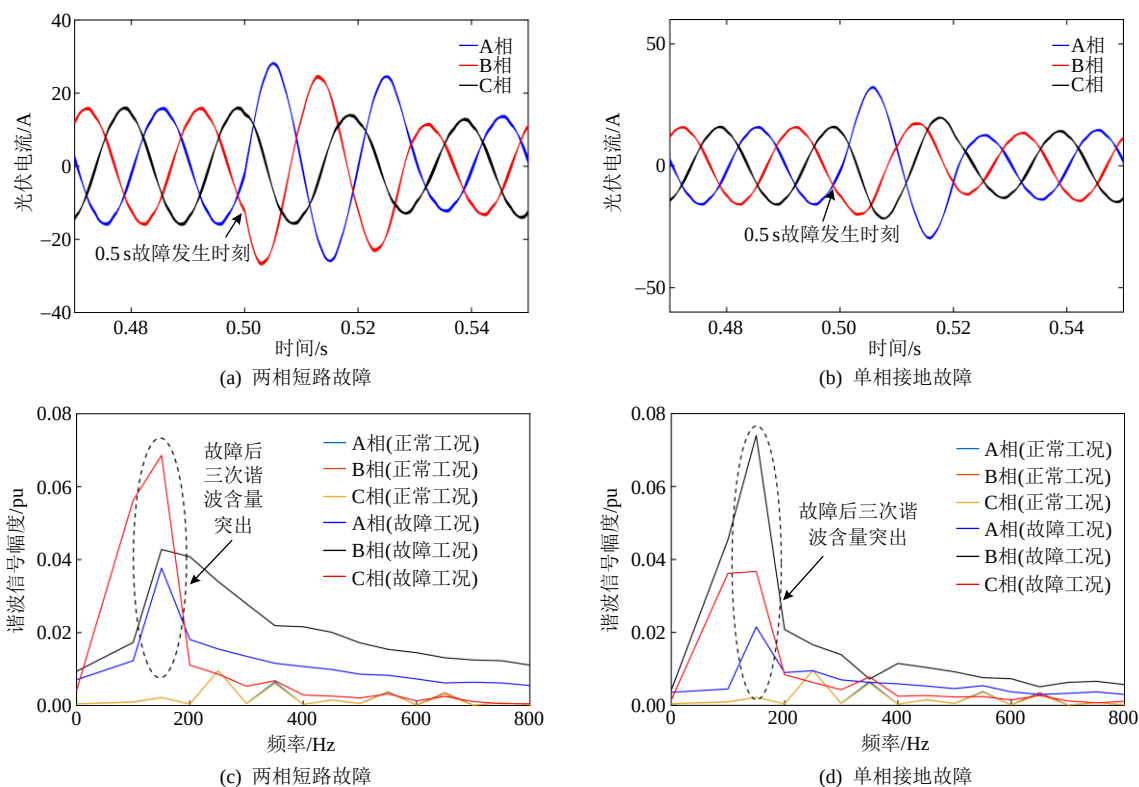


图14 不对称故障光伏输出电流傅里叶分析

Fig. 14 Fourier analysis of PV output current with asymmetric faults

由图 14 可知, 不对称故障(单相接地、两相短路)发生时, 光伏输出电流中 2、3 次谐波含量均有

上升, 其中 3 次谐波上升现象尤为突出, 与本节理论分析的结论一致。

1.4 光伏电源输出谐波特性总结

配电网发生对称故障时, 由式(12)可知, 光伏电源输出电流 2 倍频分量有效值为 $|E_k U_{dch}|$, 其中 E_k 由并网控制参数和线路参数决定, U_{dch} 由故障后电压跌落量决定; 电网发生不对称故障时, 由式(18)可知, 光伏电源输出波动分量中除衰减的 2 倍频分量外同时存在 3 倍频分量, 其值大小分别为 $|E_k U_{dch_1}|$ 、 $|E_k U_{dch_2}|$ 、 $|E_k U_{dch_3}|$, 影响其值大小的因素与对称故障类似。

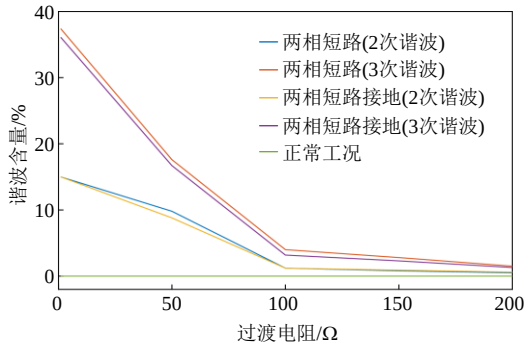
光伏电源并网控制系统参数如表 1 所示。

表 1 并网系统参数表

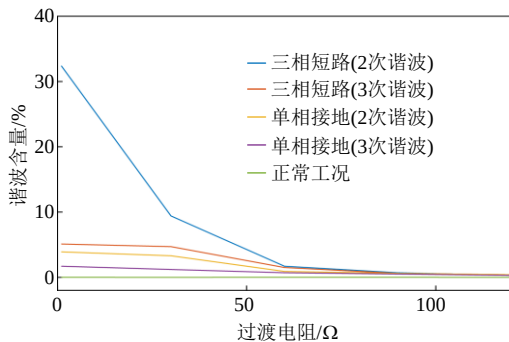
Table 1 Parameters of the grid-connected system

参数	数值	参数	数值
系统频率/Hz	50	衰减时间常数 τ_{dc}/s	0.0513
电压外环 PI 参数 K_{VP}	1	电压外环 PI 参数 K_{VI}	10
电流内环 PI 控制参数 K_{IP}	1	电流内环 PI 控制参数 K_{II}	100
K_{PWM}	1	线路参数 R_m/pu	100
线路参数 L_m/pu	0.0164	电压跌落量 γ/pu	0.2~0.9

以表 1 中参数为例, 将参数代入式(12)、(18), 计算得出不同故障下光伏电源输出谐波特性, 如图 15 所示。



(a) 两相短路故障



(b) 三相短路和单相接地故障

图 15 正常及短路情况下光伏输出谐波特性

Fig. 15 Harmonic characteristics of PV output under normal and short-circuit conditions

综上, 可量化光伏电源等效电流源模型中除基频分量外含有的 2 次和 3 次谐波分量大小, 其解析

表达 $\Delta \dot{I}_{pv,2}$ 和 $\Delta \dot{I}_{pv,3}$ 分别为式(12)、(18)。

2 多频段电流源型光伏等效模型

电网故障时, 分布式光伏输出电流的幅值和相位由并网点故障电压决定。因此, 已有研究普遍将光伏等值为受并网点电压控制的电流源模型^[3]:

$$\dot{I}_{pv,f} = f(\dot{U}_{p,f}) \quad (19)$$

式中: $\dot{I}_{pv,f}$ 为光伏输出故障电流; $\dot{U}_{p,f}$ 为故障后光伏并网点电压。

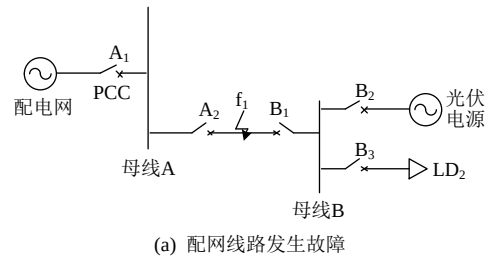
然而, 系统不对称故障时, 受控电压、电流中除正序分量外同时存在负序分量(无零序分量^[5]), 为刻画光伏的输出特性, 通常滤除负序后采用基于正序分量的控制策略, 在控制方案中只提取 PCC 电压的正序分量作为参考。光伏电源的交流侧输出特性仅受并网点正序分量影响, 将光伏电源等效为受并网点正序电压控制的电流源模型, 其输出的故障电流^[5]可表示为:

$$\begin{cases} I_q = 1.5[0.9 - (U_{p,f}^+ / U_{ref})]I_N \\ I_d = \min(P_{ref} / (1.5U_{p,f}^+), \sqrt{I_{max}^2 + I_q^2}) \end{cases} \quad (20)$$

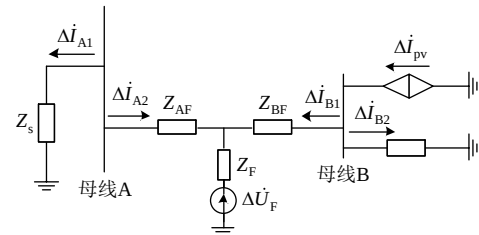
$$\dot{I}_{pv,f} = f(\dot{U}_{p,f}^+) \quad (21)$$

式中 $U_{p,f}^+$ 为光伏并网点正序电压幅值。

光伏接入配电网简化模型如图 16 所示, 以图 16(a)为例, 当 f_1 点发生故障时, 将光伏电源等效为受控电流源模型, 故障前后光伏电源输出电流分别为故障前和故障后并网点电压的函数, 获得图 16(b)所示的等效正序故障附加网络。



(a) 配网线路发生故障



(b) 正序故障分量附加网络

图 16 光伏接入配电网简化模型

Fig. 16 Simplified model of PV access to distribution grid

现有关于光伏并网输出特性的模型大多只刻画了基频量的变化规律。然而配电网馈线故障后,光伏输出电流中除基频外还蕴含丰富的倍频谐波分量。考虑故障的复杂情况和控制策略的影响,根据电网三相对称及不对称故障时光伏输出倍频谐波电流特性,本文将光伏电源等效为多个频段电流源并联的形式,如图 17 所示。等效不同故障类型下控制策略对光伏电源输出特性的影响,图中 $\Delta \dot{I}_{pv-1}$ 为配电网故障后光伏输出电流中的基频故障分量,计算如下:

$$\Delta \dot{I}_{pv-1} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} I_N \cos(\omega_1 t + \varphi_a) - I_N, & i_{pv-1} < 2I_N \\ 2I_N \cos(\omega_1 t + \varphi_a) - I_N, & i_{pv-1} \geq 2I_N \end{cases} \quad (22)$$

式中 φ_a 为光伏基频输出电流的相角。

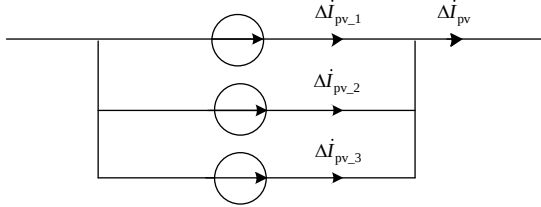


图 17 光伏受控电流源模型

Fig. 17 Model of PV controlled current source

3 保护判据设计

3.1 含光伏配电网故障特征量解析

含光伏的配电网发生短路故障时,配电网拓扑结构如图 18 所示,假设 f_1 点发生故障,光伏接入点电压失去钳制,并网点电压出现跌落。

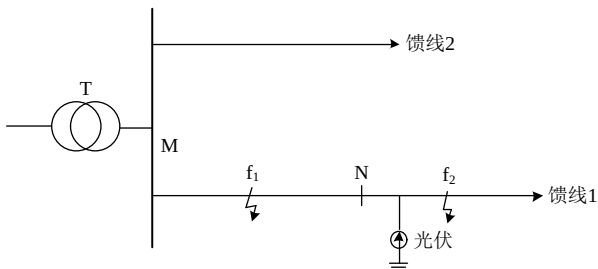


图 18 含分布式光伏的配网拓扑结构示意图

Fig. 18 Schematic diagram of distribution network topology with distributed PV

光伏等效模型采用 2 节所示多频段电流源型光伏等效模型,根据 1 节理论和仿真分析结果将不同工况下光伏输出特性映射至光伏接入后的配电网正序故障分量复合序网,由于馈线上负荷等效阻抗远大于变压器阻抗,化简正序故障分量复合序网如图 19 所示。

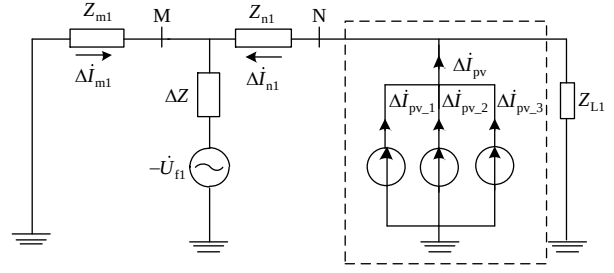


图 19 配网正序故障分量复合序网

Fig. 19 Composite sequence network of distribution network positive sequence fault component

图 19 中: $\dot{U}_{f1}$ 为故障发生前故障点处的电压, $-\dot{U}_{f1}$ 等效为正序故障分量虚拟电源;虚线框内为光伏电源故障分量等值电路; $\Delta \dot{I}_{pv}$ 为考虑控制策略后光伏向电网输出电流的变化量; $\Delta \dot{I}_{m1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{n1}$ 为差动保护检测点 M、N 处电流正序故障分量; Z_{m1} 为故障点到系统电源的正序等效阻抗; Z_{n1} 为故障点与光伏电源间的正序等效阻抗; Z_{L1} 为光伏电源下游线路和负荷的正序等效阻抗; ΔZ 为故障点附加阻抗,与故障类型有关。

计算分布式光伏接入后 M、N 检测点电压电流相位差,图 18 中 M、N 检测点的电流由 2 部分构成:一部分由故障点等效的虚拟电源产生;另一部分由光伏等效电流源产生。对于后者,其外电路阻抗为负荷阻抗 Z_{L1} 与光伏接入点上游等效阻抗 Z_{eq} 的并联,检测点 M、N 处故障电流的正序故障分量可表示为:

$$\Delta \dot{I}_{m1} = \frac{\dot{U}_{f1}}{\Delta Z + Z_{m1} // (Z_{n1} + Z_{L1})} \cdot \frac{Z_{n1} + Z_{L1}}{Z_{m1} + Z_{n1} + Z_{L1}} - \Delta \dot{I}_{pv} \frac{\Delta Z}{\Delta Z + Z_{m1}} \quad (23)$$

$$\Delta \dot{I}_{n1} = \frac{\dot{U}_{f1}}{\Delta Z + Z_{m1} // (Z_{n1} + Z_{L1})} \cdot \frac{Z_{m1}}{Z_{m1} + Z_{n1} + Z_{L1}} + \Delta \dot{I}_{pv} \quad (24)$$

故障点虚拟电源支路的外电路阻抗为 $Z_{m1} // (Z_{n1} + Z_{L1})$, 由于 Z_{L1} 阻抗较 Z_{m1} 大很多,故式(23)、(24)可简化为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{m1} = \frac{\dot{U}_{f1}}{\Delta Z + Z_{m1}} - \Delta \dot{I}_{pv} \frac{\Delta Z}{\Delta Z + Z_{m1}} \\ \Delta \dot{I}_{n1} = \Delta \dot{I}_{pv} \end{cases} \quad (25)$$

3.2 低过渡电阻短路故障判据设计

根据式(20)、(21)及图 16,考虑不同故障程度,

即过渡电阻引起故障点电压跌落量的不同, f_1 点短路故障后, 光伏侧和系统侧输出电流幅值相位关系如图 20 所示。

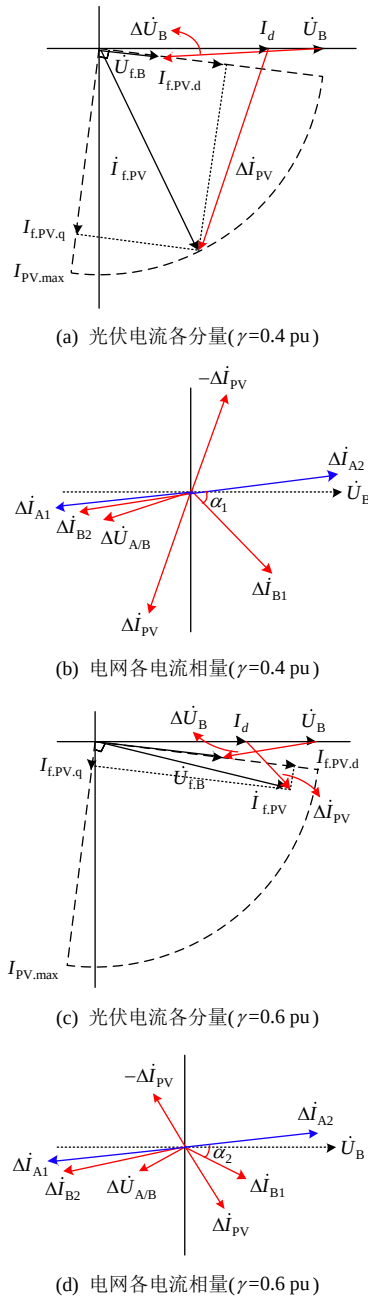


图 20 正序电流故障分量相量图

Fig. 20 Phase diagram of positive sequence current fault component

图 20 中, 以母线 B 为例, 故障前电压为 $\dot{U}_B$, 只输出有功电流 I_d ; 故障后电压为 $\dot{U}_{fB}$; 光伏输出的故障电流范围是以 $I_{PV,max}$ 为半径的弧线所围成的扇形区域。考虑不同的电压跌落量: 1) 过渡电阻较小的情况(图 20(a)), 故障后电压跌落量较大, 光伏输出电流中无功分量占比相对较高, 图中可观察到此时光伏故障电流 $\dot{I}_{f,PV}$ 和故障分量电流 $\Delta \dot{I}_{PV}$

的相位关系。将此关系代入图 15(b), 推导其中电流相量间关系, 得知此时母线 A、B 侧故障分量电流 $\Delta \dot{I}_{A2}$ 和 $\Delta \dot{I}_{B1}$ 之间夹角 α_1 接近 90° (图 20(b)); 2) 过渡电阻较大的情况(图 20(c)), 故障后电压跌落量较小, 光伏输出电流中以有功分量为主, 无功分量稍有增加, 再将此时 $\dot{I}_{f,PV}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PV}$ 的相位关系代入图 15(b), 推导其中电流相量关系, 可得母线 A、B 侧故障分量电流 $\Delta \dot{I}_{A2}$ 和 $\Delta \dot{I}_{B1}$ 之间夹角 α_2 为 $40^\circ \sim 60^\circ$ (图 20(d))。

图 21 为 f_1 点故障后不考虑光伏输出特性电压电流故障分量分布的相量图, 此时母线 A、B 侧故障分量电流 $\Delta \dot{I}_{A2}$ 和 $\Delta \dot{I}_{B1}$ 之间夹角 α_3 趋近于 0° , 与图 20 中考虑光伏输出特性的情况存在显著差异。因此, 可利用馈线保护区段的两端测量电流相位差特征设计保护判据。

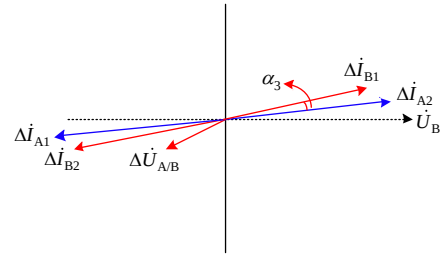


图 21 不考虑光伏输出特性时正序电流故障分量相量图
Fig. 21 Phase diagram of positive sequence current fault components without considering PV output characteristics

Matlab 仿真 10 kW 光伏(如图 18、19 所示), 配电网发生短路故障时, 在光伏多频段电流源等效模型和故障点等效虚拟电源的共同作用下, 光伏侧 ($\Delta \dot{I}_{m1}$) 和系统侧 ($\Delta \dot{I}_{m1}$) 产生的故障分量电流的相位关系如图 22 所示。

由图 22(a)、(b)可见, 区外故障工况下故障分量电流相位差接近 180° ; 由图 22(c)、(d)可见, 区内故障工况下故障分量电流相位差在 20° 左右。

此外, 区内故障发生后, 不同的故障过渡电阻引发不同的电压跌落量, 导致故障分量电流相位差发生变化, 如图 23 所示。由图可知, 不同电压跌落下, 系统侧和光伏侧故障分量电流相位差大小不一, 与电压跌落程度 γ 大小呈负相关。

此外, 考虑故障的不同类型, 相同电压跌落程度 $\gamma=0.6$ pu 下, 故障分量电流相位差同样存在差异, 如图 24 所示。由图可见, 单相接地时相位差最小, 三相短路故障时相位差最大。

为此, 综合考虑不同故障类型并尽量具备更强的抗过渡电阻能力, 考虑不同故障类型在过渡电阻

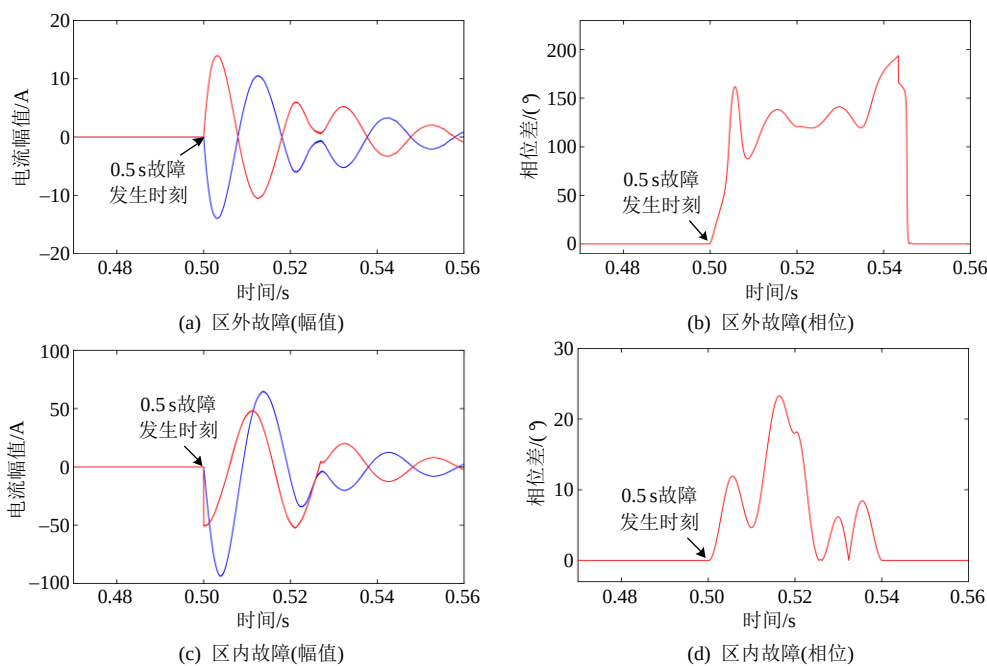


图22 配网三相短路下故障分量电流

Fig. 22 Fault component current under three-phase short circuit in distribution network

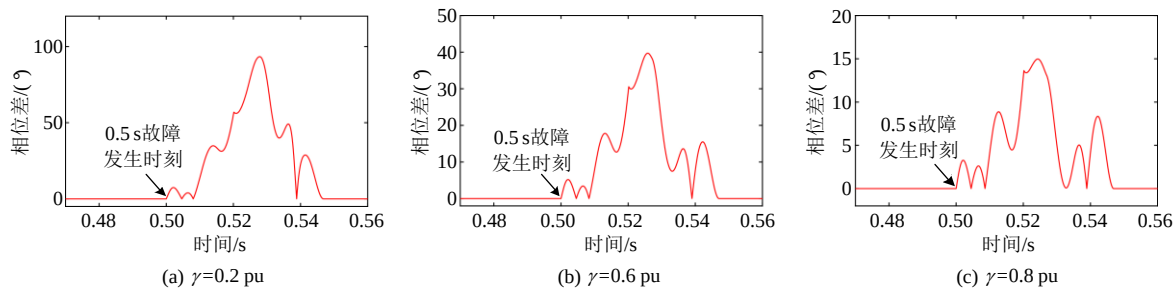


图23 配网三相短路(不同电压跌落)下故障分量电流

Fig. 23 Fault component currents under three-phase short circuit (different voltage dips) in distribution network

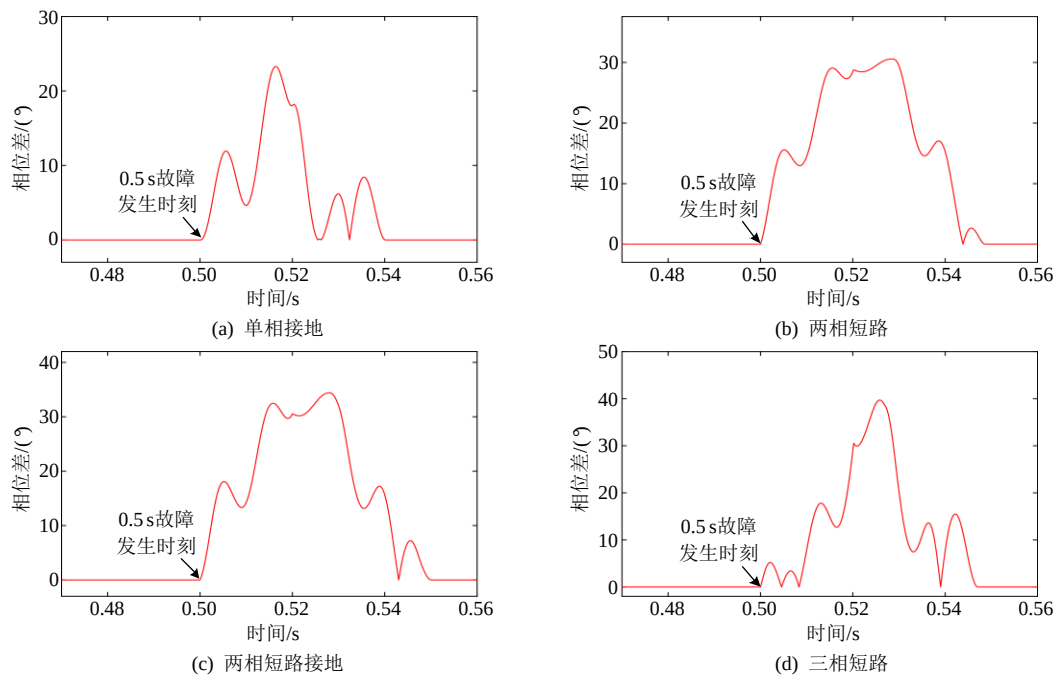


图24 不同故障类型下故障分量电流

Fig. 24 Fault component currents for different fault types

较低时制定保护判据 1 如下:

$$0^\circ \leq \arg(\Delta \dot{I}_{m1}) - \arg(\Delta \dot{I}_{n1}) \leq 125^\circ \quad (26)$$

3.3 高过渡电阻短路故障判据设计

针对判据 1 抗过渡电阻能力不足的问题, 考虑过渡电阻较大且故障位置距光伏电源较远(此时出现两端相位差取值较大且幅值比接近 1)的情况, 由图 25 所示高过渡电阻短路故障分量电流可见, 判据 1 难以区分此类故障与区外故障的差别, 保护面临拒动风险。

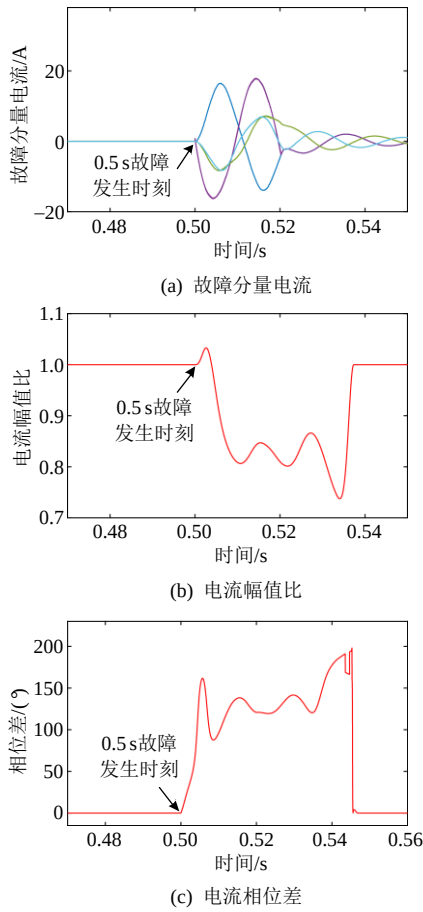


图 25 高过渡电阻短路故障分量电流

Fig. 25 High transition resistance short-circuit fault component current

根据光伏输出谐波特性的解析表达式(12)、(18)量化计算故障发生后光伏电源输出电流中 2、3 次谐波含量, 进一步考虑故障的不同类型和过渡电阻的变化, 利用正常工况和故障工况谐波含量的差异设计判据 2:

$$\Delta I_{n1,3} + \Delta I_{n1,2} \geq 0.6\% \quad (27)$$

式中: $\Delta I_{n1,3}$ 为检测点 N 的 3 次谐波故障分量电流含量; $\Delta I_{n1,2}$ 为检测点 N 的 2 次谐波故障分量电流含量。

3.4 比幅故障附加判据

考虑到判据 1 使用故障附加分量, 且配网系统正常运行时故障附加分量为 0。判据 1 的动作范围从 0 开始, 无故障时面临保护误动风险。

为解决上述问题, 本文增补了保护附加判据 3:

$$\mu = \Delta I_{m1} + \Delta I_{n1} \geq \mu_{\text{set}} I_N \quad (28)$$

过渡电阻较低时附加判据 3 与判据 1 相结合, 避免了保护误动的问题。

3.5 保护整体流程

保护整体流程如图 26 所示。

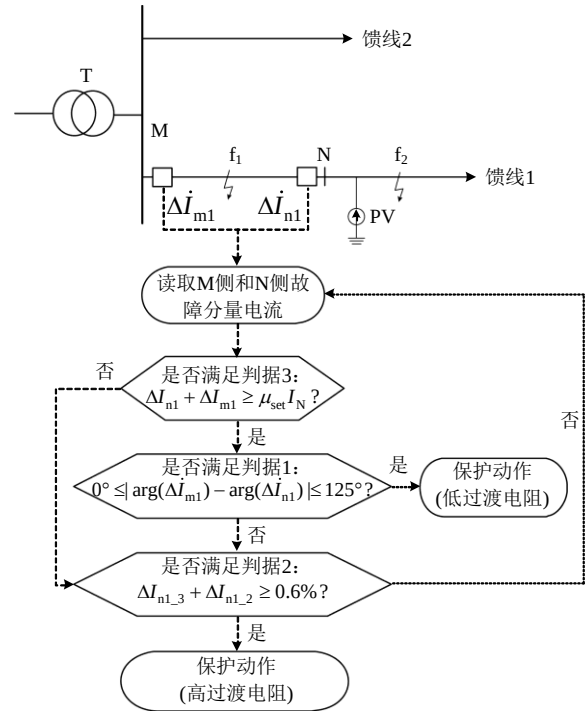


图 26 保护整体流程图

Fig. 26 Protection overall flow chart

4 仿真分析

4.1 仿真参数及模型

利用 Matlab/Simulink 软件搭建图 18 所示的有源配电网仿真模型, 光伏电源容量为 10 kW, 光伏并网控制策略包括正序 PQ 并网控制策略、低电压穿越控制策略、变流器输出限流控制策略; 馈线阻抗参数为: $Z=(0.13+j0.402)\Omega/\text{km}$; 馈线长度为 5 km^[19]。

4.2 低过渡电阻短路故障的仿真分析

故障发生时刻为 0.5 s, 考虑不同故障类型和过渡电阻大小, 光伏侧与系统侧电流如图 27 所示。

取 $\mu_{\text{set}}=0.3$, 比幅判据(判据 3)识别情况如表 2 所示。

由表 2 可知, 配电网发生不同类型短路故障后, 附加判据 3 均能够可靠动作。

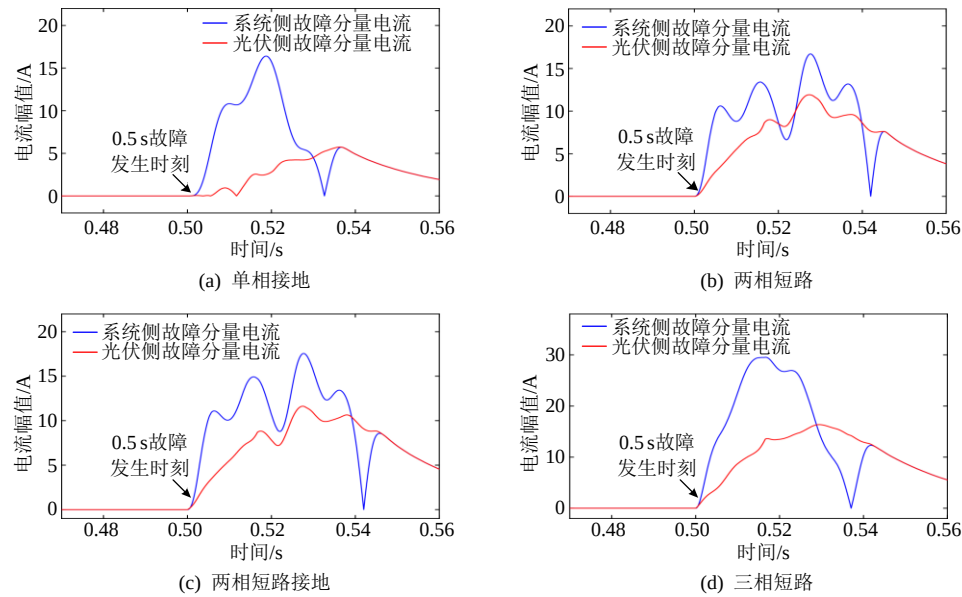


图 27 不同类型故障下系统侧与光伏侧故障分量电流

Fig. 27 System-side and PV-side fault component currents after different types of faults

表 2 比幅判据动作情况

Table 2 Ratio criterion action

故障类型	过渡电阻/ Ω	$\Delta I_{n1}/A$	$\Delta I_{m1}/A$	判据 3	是否动作	故障类型	过渡电阻/ Ω	$\Delta I_{n1}/A$	$\Delta I_{m1}/A$	判据 3	是否动作
单相接地故障	1	2.866	7.288	$2.200>0.3$	是	两相短路接地	1	2.870	7.310	$6.480>0.3$	是
	5	3.116	6.154	$0.580>0.3$	是		5	3.120	6.180	$1.680>0.3$	是
	10	5.320	3.400	$0.401>0.3$	是		10	3.400	5.340	$0.601>0.3$	是
两相短路	1	2.430	6.330	$6.050>0.3$	是	三相短路	1	2.870	7.310	$15.800>0.3$	是
	5	2.630	5.360	$1.540>0.3$	是		5	3.120	6.170	$3.810>0.3$	是
	10	2.880	4.600	$0.560>0.3$	是		10	3.400	5.340	$1.270>0.3$	是

根据判据 1，不同类型低过渡电阻短路故障时 (f₁)时，检测点间相位差满足判据 1 动作条件，保护可靠动作；区内故障时 (f₂)，保护不动作，判据 1 仿真结果如表 3 所示，可见：配电网发生区内故障

表 3 低过渡电阻时短路故障仿真结果

Table 3 Short-circuit fault simulation results under low transition resistance

故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	η/pu	判据 1: $ \arg(\Delta I_{m1}) - \arg(\Delta I_{n1}) /(^\circ)$	是否动作	故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	η/pu	判据 1: $ \arg(\Delta I_{m1}) - \arg(\Delta I_{n1}) /(^\circ)$	是否动作
三相短路	f ₁	0.1	0.120	75.90	是	两相短路	f ₁	0.1	0.452	51.20	是
		1.0	0.230	62.80	是			1.0	0.475	48.30	是
		5.0	0.510	39.00	是			5.0	0.640	33.80	是
		10.0	0.720	39.61	是			10.0	0.790	35.90	是
两相短路	f ₂	0.1	0.110	180.00	否	两相短路	f ₂	0.1	0.382	180.00	否
		1.0	0.240	180.00	否			1.0	0.455	180.00	否
		5.0	0.530	180.00	否			5.0	0.680	180.00	否
		10.0	0.750	180.00	否			10.0	0.810	180.00	否
单相接地	f ₁	0.1	0.677	33.48	是	两相短路	f ₁	0.1	0.454	52.06	是
		1.0	0.744	39.39	是			1.0	0.476	47.50	是
		5.0	0.870	26.70	是			5.0	0.645	33.67	是
		10.0	0.920	0.00	是			10.0	0.792	31.74	是
单相接地	f ₂	0.1	0.920	180.00	否	接地	f ₂	0.1	0.450	180.00	否
		1.0	0.940	180.00	否			1.0	0.484	180.00	否
		5.0	0.950	180.00	否			5.0	0.650	180.00	否
		10.0	0.970	180.00	否			10.0	0.800	180.00	否

可有效识别此类故障。

4.3 高过渡电阻短路故障的仿真分析

配电网发生不同类型短路故障时，考虑不同过渡电阻，判据 2 动作结果如表 4 所示，可见，判据 2 在判据 1 的基础上进一步提高了保护抗过渡电阻能力。

表 4 高过渡电阻时短路故障仿真结果

Table 4 Short-circuit fault simulation results under high transition resistance

故障类型	过渡电阻/ Ω	谐波含量/%		判据 2: $\Delta I_{n1-3} + \Delta I_{n1-2} / \%$	是否动作
		2 次谐波	3 次谐波		
正常工作		0.032	0.012	0.044	否
三相短路	200	0.950	0.400	1.350	是
	400	0.480	0.280	0.770	是
	500	0.380	0.250	0.630	是
	600	0.300	0.210	0.510	否
单相接地	50	0.670	0.950	1.620	是
	100	0.540	0.650	1.190	是
	220	0.280	0.380	0.660	是
	300	0.170	0.220	0.390	否
两相短路	200	0.580	1.510	2.090	是
	300	0.600	0.800	1.400	是
	500	0.490	0.420	0.910	是
	800	0.350	0.310	0.660	是
	1000	0.130	0.310	0.440	否
两相短路 接地	200	0.630	1.480	2.110	是
	300	0.620	0.823	1.443	是
	500	0.490	0.410	0.900	是
	800	0.340	0.320	0.660	是
	1000	0.130	0.280	0.410	否

4.4 与现有方法的对比分析

为了验证本文所提差动保护方法的优越性，将本文所提方案与现有差动保护方法进行对比分析。仿真中充分考虑到不同故障场景、不同故障类型和不同过渡电阻情况，仿真结果如表 5 所示。

由表 5 可知：文献[20]利用相位差信息，在短路过渡电阻较大、电压跌落量较小时保护效果较好，但由于没有考虑光伏电源并网控制的影响，在过渡电阻过大导致区内故障出现穿越性电流时保护将失效；文献[5]在文献[20]的基础上结合幅值比信息，能进一步提高抗过渡电阻能力，但同样无法避免穿越性电流时保护失效的问题；文献[21]采用负序信息设计差动保护判据，在电网发生对称故障时保护会失效；本文所提方案在常规相位差动保护的基础上融合了故障分量电流 2、3 次谐波分量信息，能够有效识别不同短路故障类型，进一步提高

表 5 与现有方法仿真结果的横向对比情况

Table 5 Horizontal comparison with the simulation results of existing methods

故障类型	过渡电阻/ Ω	保护方案			
		文献[20]	文献[5]	文献[21]	本文方案
三相短路	1	拒动	正确	拒动	正确
	5	拒动	正确	拒动	正确
	10	正确	正确	拒动	正确
	50	正确	正确	拒动	正确
	120	拒动	拒动	拒动	正确
单相接地	1	拒动	正确	正确	正确
	5	拒动	正确	正确	正确
	10	正确	正确	正确	正确
	50	拒动	正确	正确	正确
	120	拒动	拒动	正确	正确
两相短路	1	拒动	正确	正确	正确
	5	拒动	正确	正确	正确
	10	正确	正确	正确	正确
	50	拒动	正确	正确	正确
	120	拒动	拒动	正确	正确
两相短路 接地	300	拒动	拒动	正确	正确
	500	拒动	拒动	正确	正确
	800	拒动	拒动	正确	正确
	1000	拒动	拒动	正确	正确
	1200	拒动	拒动	正确	正确
三相短路 接地	1	拒动	正确	正确	正确
	5	拒动	正确	正确	正确
	10	正确	正确	正确	正确
	50	拒动	正确	正确	正确
	120	拒动	拒动	正确	正确
单相短路	300	拒动	拒动	正确	正确
	500	拒动	拒动	正确	正确
	800	拒动	拒动	正确	正确
	1000	拒动	拒动	正确	正确
	1200	拒动	拒动	正确	正确

了保护的抗过渡电阻能力，对光伏入网的情景具有更强的适应性。

5 结论

针对光伏接入的配电网馈线短路故障，提出了一种电流故障分量基频幅相特征融合 2、3 次谐波分量信息的差动保护方案，结论如下：

1) 光伏输出特性由变流器内外环控制信号的变化规律决定，根据并网比例-积分环节的控制原理获得此规律，进而推导光伏电源输出电流故障分量基频与 2、3 次谐波分量的时域解析表达式，发现故障前后上述电气特征变化明显且与故障类型和过渡电阻大小有关，对称故障时 2 次谐波分量陡增变化明显，不对称故障时 2、3 次谐波分量均会上升且 3 次谐波占比更高。

2) 基于上述特征本文所提判据分为 2 个部分。

过渡电阻较小时,故障程度更严重,利用短路电流故障分量在差动保护区段两侧相位和幅值关系,即可设计判据保证低过渡电阻下保护的可靠动作;过渡电阻较大时,又融合光伏输出电流 2、3 次谐波含量信息,增设判据,最终所提方案具有较强抵抗过渡电阻的能力。

3) 所提新型差动保护方案经过仿真验证表明,在不同故障类型、故障位置和过渡电阻下均能够可靠动作,证明在光伏接入后的配电系统故障时具有更高的适应性。

此外,本文研究尚有一些不足之处:1) 忽略了光伏接入位置差异对保护的影响,且本文针对新能源占比相对较低的情况,随着光伏占比进一步增加,所提方案仍有待进一步完善;2) 本文仅推导出光伏输出电流 2、3 次谐波含量突出这一结论并用二者作为保护判据,尚未详细探讨二者含量占比关系,若能细化各次谐波比例关系,有利于更进一步揭示光伏输出特性,拓宽故障判别原理的设计思路。优化上述问题,提高保护效率,仍有待后续进一步研究。

参考文献

- [1] 吴争荣,王钢,李海锋,等.含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J].中国电机工程学报,2013,33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136(in Chinese).
- [2] 梁莹玉,卢正杰.基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动保护[J].电网技术,2022,46(6): 2268-2275.
LIANG Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2268-2275(in Chinese).
- [3] 李娟,高厚磊,朱国防.考虑逆变类分布式电源特性的有源配电网反时限电流差动保护[J].电工技术学报,2016,31(17): 74-83.
LI Juan, GAO Houlei, ZHU Guofang. Inverse-time current differential protection in active distribution network considering characteristics of inverter-interfaced distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 74-83(in Chinese).
- [4] 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.
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(in Chinese).
- [5] 朱妍,陆于平.含DG配网充分式优选制综合电流幅值差动保护[J].中国电机工程学报,2018,38(S1): 68-74.
ZHU Yan, LU Yuping. Sufficient optimized comprehensive current amplitude differential protection for distribution network with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 68-74(in Chinese).
- [6] 韩海娟,牟龙华,张凡,等.考虑IIDG低电压穿越时的微电网保护[J].中国电机工程学报,2017,37(1): 110-120.
HAN Haijuan, MU Longhua, ZHANG Fan, et al. Microgrid protection considering low voltage ride-through of IIDG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 110-120(in Chinese).
- [7] ZANG Lingdong, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A d-axis based current differential protection scheme for an active distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 23.
- [8] ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, ZANG Lindong, et al. Current differential protection for active distribution networks based on improved fault data self-synchronization method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 166-178.
- [9] MISHRA P, PRADHAN A K, BAJPAI P. Adaptive distance relaying for distribution lines connecting inverter-interfaced solar PV plant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(3): 2300-2309.
- [10] 郑涛,黄予园,宗伟,等.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[J].电力系统保护与控制,2020,48(12): 13-22.
ZHENG Tao, HUANG Yuyuan, ZONG Wei, et al. Second harmonic generation mechanism of a photovoltaic grid-connected system fault and its influence on transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 13-22(in Chinese).
- [11] 黄涛,王胜利,谢华,等.光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析[J].电力自动化设备,2020,40(5): 99-108.
HUANG Tao, WANG Shengli, XIE Hua, et al. Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 99-108(in Chinese).
- [12] 晁晨棚,郑晓冬,高飘,等.含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J].中国电机工程学报,2021,41(20): 6968-6978.

- CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6978(in Chinese).
- [13] MAHAMED B, FLETCHER J E. The equivalent models of grid-forming inverters in the sequence domain for the steady-state analysis of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2876-2887.
- [14] 薛士敏, 孙亚冰, 刘白冰, 等. 基于 Marti 模型的柔性直流输电系统纵联行波差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6288-6299.
- XUE Shimin, SUN Yabing, LIU Baibing, et al. Longitudinal travelling wave differential protection for flexible HVDC system based on Marti model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6288-6299(in Chinese).
- [15] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 低压有源配电网在线故障区间定位与识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2525-2538.
- NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. On-line fault section location and classification technique for low voltage active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2525-2538(in Chinese).
- [16] 郑浩, 林湘宁, 金能, 等. 母线保护 TA 饱和快速闭锁与再开放判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5805-5816.
- ZHENG Hao, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. Research on TA saturation fast blocking and reopening criterion for bus protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5805-5816(in Chinese).
- [17] SONG H S, NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [18] JIA Ke, YANG Zhe, FANG Yu, et al. Influence of inverter-interfaced renewable energy generators on directional relay and an improved scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11843-11855.
- [19] 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4335-4353.
- GAO Bingtuan, HU Zhengyang, WANG Weisheng, et al. Review of fast active power control and frequency support technologies for renewable energy plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4335-4353(in Chinese).
- [20] 毛明轩, 李鹏燕, 许钊, 等. 路面光伏并网系统建模与谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8039-8049.
- MAO Mingxuan, LI Pengyan, XU Zhao, et al. Modeling and interharmonic analysis of roadway-integrated photovoltaic grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8039-8049(in Chinese).
- [21] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 计及光伏阵列的光伏发电阻抗建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5122-5135.
- LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Impedance modeling and characteristics analysis of photovoltaic array-based grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5122-5135(in Chinese).
- [22] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 66-67.
- XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Relaying protection and automation of distribution networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 66-67(in Chinese).
- [23] 曹贵明. 基于正序故障分量的含分布式电源配电网保护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- CAO Guiming. Protection researches of distribution network based on the positive sequence fault components [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012 (in Chinese).
- [24] 肖澍昱, 林湘宁, 魏繁荣, 等. 面向含不可测分支配电线路不对称故障可靠辨识的负序电流比相保护判据[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2435-2447.
- XIAO Shuyu, LIN Xiangning, WEI Fanrong, et al. Phase comparison protection of negative sequence current for distribution lines with unmeasurable branches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2435-2447(in Chinese).



籍宏震

在线出版日期: 2025-02-20。

收稿日期: 2024-07-02。

作者简介:

籍宏震(1999), 男, 博士研究生, 主要从事新型电力系统保护方面的研究工作, 3112608919@qq.com;

*通信作者: 王媛媛(1980), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统继电保护等方面的研究工作, wyy_1202@163.com。

(责任编辑 李泽荣)