

光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析

黄涛¹, 王胜利^{2,3}, 谢华¹, 赵青春¹, 顾乔根¹, 徐晓春¹, 戴光武¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;
3. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 系统发生不对称故障时, 短路电流、电压中出现负序分量, 导致光伏逆变器直流母线电压中产生二倍频振荡, 该振荡分量经过控制回路流通后将在光伏逆变器输出短路电流中生成3次谐波。推导了逆变器输出短路电流3次谐波的解析表达式, 计及光伏逆变器的限幅控制特性、负序控制策略、低电压穿越策略, 研究了3次谐波的变化特性, 然后分析了3次谐波对变压器差动保护电流互感器饱和和判据的影响, 指出某些工况下光伏逆变器输出短路电流中的3次谐波含量较大, 可能造成变压器差动保护误闭锁, 导致变压器区内故障无法切除, 并提出了相应的应对策略。大量的仿真试验结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 光伏逆变器; 3次谐波; 限幅特性; 负序控制; 电流互感器饱和; 继电保护; 变压器差动保护

中图分类号: TM 77; TM 464

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202004025

0 引言

随着新能源大规模接入电网, 其对继电保护的影响问题受到越来越多的关注^[1-4]。新能源发电大量采用电力电子设备, 与传统同步发电机存在较大差异, 新能源的短路电流水平^[5-6]、等效阻抗^[7-8]、谐波等暂态特性均呈现出很多新的特点。

短路电流中的谐波会给电气量特征提取以及一些利用特定次数谐波特征的保护原理造成影响。当前针对新能源故障输出谐波特性的研究主要集中在双馈风电机组, 如文献[9-11]均指出投入撬棒电路时, 双馈风电机组输出的短路电流中会出现转速频率间谐波分量, 影响傅氏算法的精确性, 文献[11]还分析了双馈风电机组故障输出2次谐波、3次谐波的机理; 文献[12]研究了双馈风电机组短路电流中的2次谐波及其对变压器保护2次谐波制动的影响。目前也有文献对稳态运行时光伏逆变器的谐波特性进行研究, 如文献[13]研究了光伏逆变器电力电子开关频率带来的超高次谐波; 文献[14]针对光伏逆变器直流母线电压纹波会造成短路电流畸变的现象, 提出了一种母线电压纹波补偿方法。但对于故障期间光伏逆变器的输出谐波特性以及谐波特性的影响因素目前尚缺乏深入的研究。

本文研究了发生不对称故障时光伏逆变器输出谐波特性、短路电流3次谐波的产生机理以及控制策略对输出谐波的影响, 并分析了3次谐波给变压器差动保护带来的影响。

1 光伏逆变器控制策略

1.1 光伏逆变器数学模型

光伏逆变器电路结构如图1所示。图中, i_{array} 、 P_{array} 分别为光伏阵列输出的电流、功率; i_{dc} 、 P_{in} 分别

为逆变器直流侧输入电流、功率; u_{dc} 为直流电压; C 为直流电容; u_a 、 u_b 、 u_c 为逆变器输出电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器输出电流; e_a 、 e_b 、 e_c 为电网电压; R 、 L 分别为滤波电路的电阻、电感。

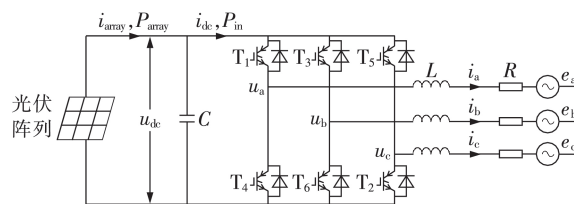


图1 光伏逆变器电路结构

Fig.1 Circuit structure of photovoltaic inverter

根据图1中的电压、电流参考方向, 引入比例-积分(PI)控制器、前馈补偿及电压扰动, 可得 dq 同步旋转坐标系下光伏逆变器的数学模型为^[15]:

$$\begin{cases} u_d^* = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_d^* - i_d) - \omega_1 L i_q + R i_d + e_d \\ u_q^* = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_q^* - i_q) + \omega_1 L i_d + R i_q + e_q \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_d^* 、 u_q^* 和 i_d^* 、 i_q^* 分别为 d 、 q 轴电压和电流参考值; e_d 、 e_q 分别为 d 、 q 轴电网电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴输出电流; k_{ip} 、 k_{ii} 分别为电流PI控制器的比例、积分系数; ω_1 为同步角速度; s 为拉氏算子。

为了更好地提升逆变器的输出特性, 目前国内很多文献提出了逆变器的正、负序控制策略, 其中正序控制策略控制逆变器输出期望的有功、无功, 负序控制策略控制逆变器输出有功、无功的波动^[16]。

1.2 正序控制策略

采用 d 轴电压定向后, 通过分别控制 d 、 q 轴正序电流 i_d^+ 、 i_q^+ 可以实现逆变器输出有功功率、无功功率的独立解耦控制, 实际有功功率的控制通过维持直

流电压的稳定实现,无功功率的控制一般直接给定指令值 i_q^{**} ,由此得到逆变器正序控制框图如图2所示。图中, u_{dc}^* 、 u_{dc} 分别为直流电压的指令值和实际值; u_d^{**} 、 u_q^{**} 分别为正序 d 、 q 轴电压指令值; e_d^+ 、 e_q^+ 分别为正序 d 、 q 轴电网电压; i_d^{**} 为正序 d 轴电流指令值; k_{up} 、 k_{ui} 分别为电压PI控制器的比例、积分系数; k_{ip}^+ 、 k_{ii}^+ 分别为正序电流PI控制器的比例、积分系数。

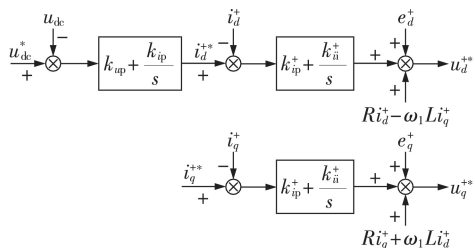


图2 正序控制框图

Fig.2 Block diagram of positive-sequence control

按照低电压穿越的要求,故障期间光伏逆变器应向电网输送无功功率支撑电压,无功电流指令值按照式(2)给定^[17]。

$$\begin{cases} i_q^{**} = 0 & U_T > 0.9 \text{ p.u.} \\ i_q^{**} \geq 1.5(0.9 - U_T)I_N & 0.2 \text{ p.u.} \leq U_T \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ i_q^{**} \geq 1.05 I_N & U_T < 0.2 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_T 为并网点电压标么值; I_N 为逆变器额定电流标么值。

1.3 负序控制策略

当系统处于不对称运行状态时,逆变器馈入电网的功率将发生振荡,导致输出电能质量大幅降低从而影响电网安全运行。当电网电压、电流不对称时,光伏逆变器输出功率可以表示为:

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega_1 t) + P_{s2} \sin(2\omega_1 t) \\ Q = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega_1 t) + Q_{s2} \sin(2\omega_1 t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_0 = e_d^+ i_d^+ + e_q^+ i_q^+ + e_d^- i_d^- + e_q^- i_q^- \\ P_{c2} = e_d^+ i_d^- + e_q^+ i_q^- + e_d^- i_d^+ + e_q^- i_q^+ \\ P_{s2} = e_q^- i_d^+ - e_d^- i_q^+ - e_q^+ i_d^- + e_d^+ i_q^- \\ Q_0 = e_q^+ i_d^+ - e_d^+ i_q^+ + e_q^- i_d^- - e_d^- i_q^- \\ Q_{c2} = e_q^- i_d^+ - e_d^- i_q^+ + e_q^+ i_d^- - e_d^+ i_q^- \\ Q_{s2} = -e_d^- i_d^+ - e_q^- i_q^+ + e_d^+ i_d^- + e_q^+ i_q^- \end{cases} \quad (4)$$

其中, e_d^- 、 e_q^- 分别为负序 d 、 q 轴电网电压; i_d^- 、 i_q^- 分别为逆变器输出负序 d 、 q 轴电流。

文献[16]提出了不对称运行的3种控制目标:①目标Ⅰ为抑制电网负序电流;②目标Ⅱ为抑制逆变器的无功功率二倍频振荡;③目标Ⅲ为抑制逆变器的有功功率二倍频振荡。

根据式(4)可以得到各控制目标下负序电流指令值如下:

$$\begin{cases} i_d^{-*} = \rho(e_d^- i_d^{**} + e_q^- i_q^{**})/e_d^+ \\ i_q^{-*} = \rho(e_q^- i_d^{**} - e_d^- i_q^{**})/e_d^+ \end{cases} \quad (5)$$

其中, ρ 取值为0、1、-1时,分别对应目标Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ。

负序控制框图与正序类似,将 ω_1 换成 $-\omega_1$ 即可,详见附录A中的图A1。

1.4 电流指令值优先原则

由于电力电子器件通流能力有限,在控制过程中必须对逆变器电流进行限幅,一般可取限幅值为 $I_{lim} = 1.2 I_N$ 。在电流限幅条件下,上述正、负序电流参考值可能无法同时满足,此时需要制定电流指令值优先原则,按照并网规范的要求,可制定如下规则。

(1) $U_T > 0.9 \text{ p.u.}$

并网点电压轻微跌落时,逆变器不输出无功电流,此时应以有功电流优先,使光伏组件的功率可以顺利输出,防止直流母线电压升高,剩余的电流裕度可用于负序指令值的输出。

(2) $U_T \leq 0.9 \text{ p.u.}$

并网点电压跌落严重时,按照低电压穿越的要求,逆变器优先输出无功电流,然后输出负序电流抑制功率波动,由于电压跌落严重时,直流侧的卸荷电路会投入以消耗多余的能量防止直流电压的持续上升,所以正序有功电流参考值可以最后考虑。

2 短路电流3次谐波特性研究

2.1 直流母线电压二倍频波动分析

发生不对称故障时,忽略逆变器功率损耗,由图1可得直流电压方程为:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{array} - i_{dc} = \frac{P_{array} - P}{u_{dc}} \quad (6)$$

将式(3)中的有功功率表达式代入式(6),并假设有功功率平均值 P_0 与光伏阵列的有功功率 P_{array} 相等,则由式(6)可以解出:

$$u_{dc} = \sqrt{\frac{1}{C} \left[-\frac{P_{c2} \sin(2\omega_1 t)}{\omega_1} + \frac{P_{s2} \cos(2\omega_1 t)}{\omega_1} \right] + u_{dc|0|}^2} \quad (7)$$

其中, $u_{dc|0|}$ 为故障前的直流电压。

可见,逆变器输出有功功率中的二倍频波动会导致直流电压也出现二倍频波动,且有功功率波动幅度越大,直流电压波动幅度也越大。

2.2 短路电流3次谐波产生机理

根据图2,直流电压中的二倍频分量会引起 i_d^{**} 中也出现二倍频分量,再根据式(5)可知负序电流指令值是 i_d^{**} 的函数,同样会出现二倍频分量。电流指令值中的二倍频分量经过控制回路流通后,将在输出电压中产生新的频率分量,下面具体分析。

假设 u_{dc} 中的二倍频分量为:

$$u_{dc,2} = U_{dc,2} \cos(2\omega_1 t + \varphi_{dc,2}) \quad (8)$$

其中, $U_{dc,2}$ 、 $\varphi_{dc,2}$ 分别为直流电压二倍频分量的幅值、初相角。

根据图2,该二倍频分量经过控制回路后最终在电压参考值中产生的分量可表示为:

$$U_{d,2}^{**}(s) = U_{dc,2}(s) \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) \left(k_{ip}^+ + \frac{k_{ii}^+}{s} \right) \quad (9)$$

其中, $U_{dc,2}(s)$ 为 $u_{dc,2}$ 的拉氏变换。

对式(9)进行拉氏反变换,可得:

$$u_{d,2}^{**} = U'_{dc,2} \cos(2\omega_1 t + \varphi_{dc,2}) + U''_{dc,2} \sin(2\omega_1 t + \varphi_{dc,2}) - U'''_{dc,2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} U'_{dc,2} = U_{dc,2} \left(k_{up} k_{ip}^+ - \frac{k_{ui} k_{ii}^+}{4\omega_1^2} \right) \\ U''_{dc,2} = U_{dc,2} \left(\frac{k_{up} k_{ii}^+}{2\omega_1} + \frac{k_{ui} k_{ip}^+}{2\omega_1} \right) \end{cases}$$

其中, $U'''_{dc,2}$ 为直流分量。

由于直流电压二倍频分量不在 q 轴回路中流通,对应的 $u_{q,2}^{**} = 0$,将式(10)中的二倍频分量变换到三相静止坐标系,得到三相电压指令值为:

$$\begin{cases} u_{A,2}^{**} = M_{dc,2} [\cos(\omega_1 t + \varphi'_{dc,2}) + \cos(3\omega_1 t + \varphi'_{dc,2})] \\ u_{B,2}^{**} = M_{dc,2} \left[\cos\left(\omega_1 t + \varphi'_{dc,2} + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(3\omega_1 t + \varphi'_{dc,2} - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ u_{C,2}^{**} = M_{dc,2} \left[\cos\left(\omega_1 t + \varphi'_{dc,2} - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(3\omega_1 t + \varphi'_{dc,2} + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (11)$$

其中, $M_{dc,2} = \frac{1}{2} \sqrt{(U'_{dc,2})^2 + (U''_{dc,2})^2}$; $\varphi'_{dc,2} = \varphi_{dc,2} - \varphi_1$, $\varphi_1 = \arctan \frac{U''_{dc,2}}{U'_{dc,2}}$ 。

从式(11)中可以看出,直流电压中的二倍频分量流过控制回路后,最终在逆变器输出正序电压指令值中除了仍然生成基频负序分量外,还增加了一项非零序3次谐波分量,这将导致光伏逆变器输出电流中也出现3次谐波分量。

同理,参照上述推导过程,负序电流指令值中的二倍频分量通过负序控制回路后,将在负序电流中生成3次谐波分量。

2.3 3次谐波特性分析

将 $U'_{dc,2}$ 、 $U''_{dc,2}$ 代入 $M_{dc,2}$ 的表达式可得:

$$M_{dc,2} = \frac{U_{dc,2}}{2} \sqrt{k_{up}^2 (k_{ip}^+)^2 + \frac{k_{ui}^2 (k_{ii}^+)^2}{16\omega_1^4} + \frac{k_{up}^2 (k_{ii}^+)^2}{4\omega_1^2} + \frac{k_{ui}^2 (k_{ip}^+)^2}{4\omega_1^2}} \quad (12)$$

由式(12)可知3次谐波的大小与直流电压中的二倍频分量大小以及电压、电流控制器的比例积分

系数成正比。该3次谐波是因电压、电流中的负序分量而产生,只要不对称故障没有切除,3次谐波将一直存在。

由于3次谐波的大小主要由 d 轴有功电流中的二倍频波动决定,会受到故障后无功电流输出、负序控制策略及故障前有功输出的影响。考虑限幅特性和负序控制策略,逆变器输出3次谐波还具有如下特点:

(1)电压跌落幅度很小时,直流电压的二倍频波动也较小,逆变器输出3次谐波含量不会太大;

(2)电压跌落程度很大时,按照无功优先原则,电流裕度大部分用于输出无功功率,有功电流参考值中的二倍频波动被大量抑制,逆变器输出3次谐波含量会减少;

(3)由于故障后电压发生跌落,为了维持输出功率不变,输出的电流必须增大,如果故障前输出有功功率已经很大,则故障后有功电流增大的空间有限,二倍频波动同样被抑制,3次谐波含量也会降低;

(4)根据文献[16]的研究结论,相同故障情况下,负序控制采用目标Ⅱ时的有功功率二倍频波动最大,采用目标Ⅲ时的有功功率二倍频波动最小,所以采用目标Ⅱ时逆变器输出3次谐波最大。

综上所述,当电压跌落较深,故障前输出有功功率较小,故障后采用控制目标Ⅱ,且逆变器按照低电压穿越要求输出无功电流后还有裕度输出全部有功电流指令值时,逆变器输出3次谐波的含量较大。

3 3次谐波对变压器差动保护影响及对策

在变压器差动保护中,电流互感器饱和是必须要考虑的特殊问题。变压器区外故障时,如果短路电流过大,则容易造成电流互感器饱和,使得电流互感器二次侧的电流波形出现畸变,产生差流,可能引起差动保护的误动作。

发生电流互感器饱和时,变压器饱和侧电流会出现明显的畸变,含有较大的2、3次谐波分量,所以变压器差动保护一般都配置了应对电流互感器饱和的2、3次谐波闭锁判据。

以3次谐波闭锁为例,电流互感器饱和闭锁判据为:

$$I_{\varphi 3} > K_3 I_{\varphi 1} \quad (13)$$

其中, $I_{\varphi 3}$ 为相电流中的3次谐波; $I_{\varphi 1}$ 为相电流基波; K_3 为3次谐波制动系数。

但谐波闭锁判据无法区分是区内故障电流互感器饱和还是区外故障电流互感器饱和,为了防止变压器区内故障时差动保护被误闭锁导致故障不能切除,目前工程应用中一般的处理方法是设置高、低2种不同斜率的比率制动特性,当谐波判据满足时,闭锁低值比率差动保护,依靠抗饱和能力更强的高值

比率差动保护切除故障。

某保护设备厂家的比率差动制动曲线如图3所示。图中,低值比率差动制动曲线为双折线,斜率分别为0.5、0.7, I_{qd} 为差动起动电流;高值比率差动制动曲线为单折线,斜率为0.7,起动电流提高至 $1.2I_e$ (I_e 为额定电流); I_d 为动作电流,取归算后变压器各侧电流相量和的幅值; I_r 为制动电流,取归算后变压器各侧电流幅值之和的1/2。

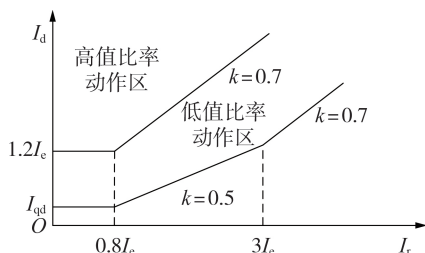


图3 比率差动保护制动曲线

Fig.3 Braking curve of ratio differential protection

由第2节的分析可知,在某些特殊工况下,发生变压器区内不对称故障时,光伏逆变器输出短路电流中含有大量的3次谐波,可能导致低值比率差动保护长时间闭锁。

在传统系统中,使得低值比率差动保护闭锁的谐波因电流互感器饱和而产生,而电流互感器饱和时短路电流必然很大,所以区内故障电流互感器饱和时仍有很大的动作电流,高值比率差动保护能可靠动作切除故障。但在光伏并网系统中,闭锁低值比率差动保护的3次谐波并不一定由电流互感器饱和造成,而且受逆变器限幅的影响,光伏侧提供的短路电流很小,如果联络线较长或者系统较弱,则系统侧提供的短路电流也不大,此时发生变压器区内故障时,动作电流可能达不到高值比率差动的要求,而低值比率差动保护又长期被闭锁,将造成区内故障无法切除,威胁到变压器设备的安全和系统的稳定运行。

为了解决上述问题,可以从逆变器控制、保护判据两方面提出相应的应对策略。

(1)逆变器控制方面,可以在控制回路中引入直流母线电压二倍频分量的补偿项,消除二倍频分量在控制回路中的流通,抑制发生不对称故障时逆变器输出3次谐波含量。

(2)保护判据方面,由于电流互感器轻度饱和时,电流互感器的二次电流仍有较大的基波分量,而电流互感器严重饱和时,二次电流波形会出现明显的间断角^[18];而光伏逆变器提供的短路电流基波幅值一般小于2倍额定值,也不会出现间断角。可以引入电流的基波大小及间断角作为3次谐波判据的辅助判据,如果某侧短路电流的3次谐波含量超过门槛值,同时该侧短路电流基波幅值小于2倍额定

值且波形没有出现较大的间断角,则认为该3次谐波不是因为电流互感器饱和而产生,不闭锁低值比率差动保护。

4 仿真实验

利用PSCAD仿真软件搭建如图4所示的光伏发电并网系统,100 MW光伏电站经箱变升压至35 kV,再经升压变升至220 kV,最后经联络线并入电网。仿真模型的参数见附录B中的表B1。

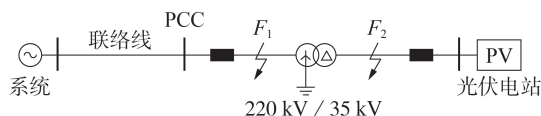


图4 仿真模型

Fig.4 Simulation model

光伏逆变器采用第1节中的控制策略,100 MW光伏电站通过等值建模方法等值为1台光伏发电单元。下面充分考虑控制器限幅特性和负序控制策略,仿真研究逆变器输出3次谐波大小及其对变压器差动保护电流互感器饱和判据的影响。

(1)仿真工况1:光伏电站等效辐照度为400 W/m²,温度为25℃,升压变高压侧出口点 F_1 在0.5 s时发生B相经50 Ω过渡电阻接地故障,逆变器负序控制策略分别采用目标Ⅱ、目标Ⅲ。

逆变器相关电气量的仿真波形如图5所示,图中正序电流、负序电流均为标么值,后同。由图可见,采用控制目标Ⅱ时,无功功率中的二倍频振荡大部分被抑制,但有功功率中的二倍频振荡被放大,造成直流母线电压中出现幅值较大的二倍频分量,进而 i_d^{+*} 、 i_d^{-*} 中都出现了明显的二倍频振荡;而采用控制目标Ⅲ时,有功功率中的二倍频振荡被抑制,相应的直流电压、电流指令值中的二倍频分量也很小。

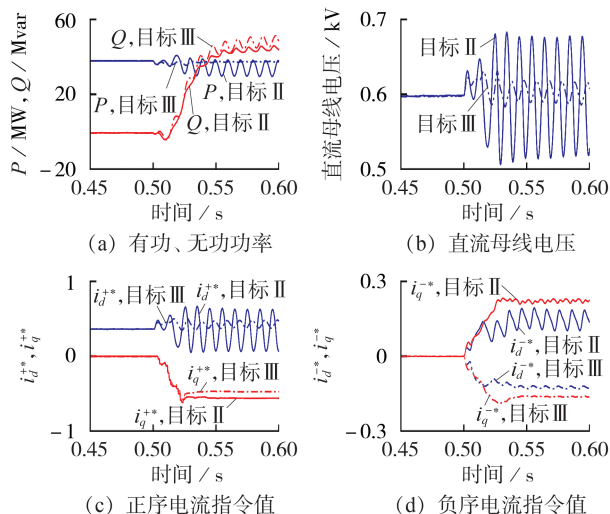


图5 仿真工况1下的逆变器电气量波形

Fig.5 Electrical waveforms of inverter under Case 1

图6为光伏电站升压变低压侧三相电流波形及各相3次谐波含量占基波的百分比 r_{3h} 。当采用控制目标Ⅱ时,低压侧三相电流中均出现了明显的3次谐波,其中C相电流的3次谐波与基波之比高达45%;而采用控制目标Ⅲ时,稳态时电流中的3次谐波含量较小,大约为5%。

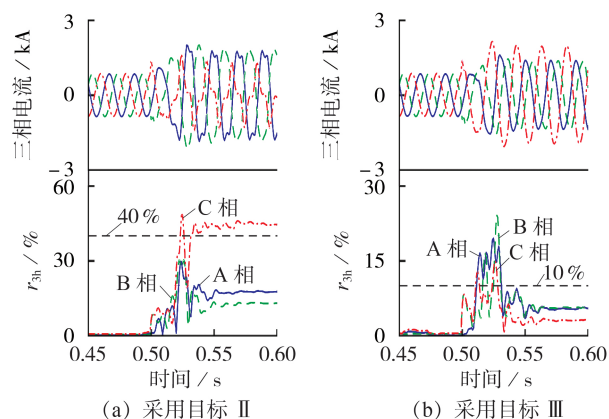


图6 仿真工况1下升压变低压侧电流3次谐波

Fig.6 Third harmonic currents at low-voltage side of booster transformer under Case 1

图7为仿真工况1采用控制目标Ⅱ,系统阻抗分别为最小、最大值时,变压器差动保护的动作特性,图中动作电流 I_d 、制动电流 I_r 均为标幺值,后同。2种情况下低压侧3次谐波含量均较大,低值比率差动保护被闭锁。由图7可见,系统阻抗最小时,B相差流轨迹位于高值比率动作区,差动保护可以动作;但系统阻抗最大时,由于差流减小,B相差流动作特性只能达到高值比率曲线的边界,差动保护可能无法动作。

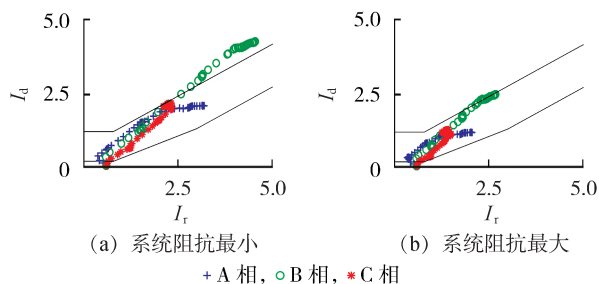


图7 仿真工况1下变压器差动保护的动作特性

Fig.7 Operating characteristic of transformer differential protection under Case 1

(2)仿真工况2:光伏电站等效辐照度为 400 W/m^2 ,温度为 25°C ,升压变低压侧出口点 F_2 分别发生BC两相经 0.5Ω 过渡电阻短路故障,逆变器负序控制策略采用目标Ⅱ。逆变器电气量波形、升压变低压侧电流3次谐波分别如附录B中的图B1、图B2所示。

由图B1(a)、(b)可见,2种过渡电阻下的有功功率、直流电压均有明显的二倍频波动,但图B1(c)、(d)中,过渡电阻为 0 时,有功电流指令值、负序电流

指令值中没有了二倍频分量,这是因为发生金属性故障时,电压跌落严重,大部分逆变器电流用于输出无功电流,图B1(c)中的 i_q^{**} 的数值超过了 1 p.u. ,已没有裕度来输出有功电流指令值, 0.52 s 后 i_q^{**} 变为 0 ,所以二倍频分量没有出现在电流指令值中。而过渡电阻为 5Ω 时,电压跌落不严重,电流裕度足够输出有功电流指令值,所以有功电流、负序电流指令值中均有明显的二倍频分量。

由图B2可见,过渡电阻为 0 时,升压变低压侧电流中的3次谐波含量仅为 5% 左右;而过渡电阻为 5Ω 时,升压变低压侧电流中的3次谐波含量显著增大,含量最大的C相接近 40% 。

图8为仿真工况2中过渡电阻为 5Ω ,系统阻抗分别为最小、最大值时,变压器差动保护的动作特性。2种系统阻抗下低压侧3次谐波含量均较大,低值比率差动保护被闭锁。从图8中同样可见,当系统阻抗最大时,三相差动电流轨迹均达不到高值比率差动保护的动区,区内故障将不能被切除。

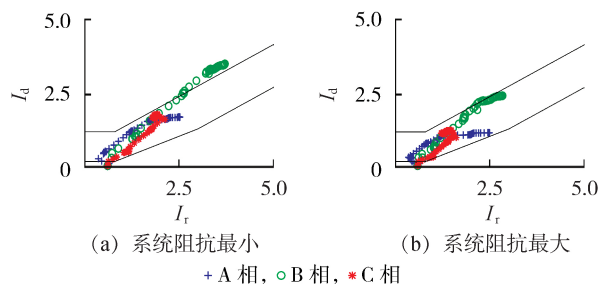


图8 仿真工况2下差动保护动作特性

Fig.8 Operation characteristic of differential protection under Case 2

仿真工况3:光伏电站等效辐照度为 1000 W/m^2 ,温度为 25°C ,升压变低压侧出口点 F_2 发生BC两相经 5Ω 过渡电阻短路故障,逆变器负序控制策略采用目标Ⅱ。逆变器电气量波形、升压变低压侧电流3次谐波分别如附录B中图B3、图B4所示。

辐照度为 1000 W/m^2 时,光伏逆变器输出的有功功率为额定值,相比于仿真工况2的 400 W/m^2 辐照度大得多。所以从图B3中可见,虽然同样是点 F_2 处发生BC两相经 5Ω 过渡电阻短路,有功功率、直流母线电压中都有明显的二倍频振荡,但由于故障前的有功电流已经很大,故障后受电流限幅的影响,有功电流中的二倍频振荡大部分被削掉了,图中还能看到些许二倍频分量处在波谷时的波形,有功电流中的二倍频分量被抑制后,负序电流中也基本没有了二倍频分量。从图B4中可见,相比仿真工况2中接近 40% 的3次谐波含量,该工况下的3次谐波含量明显减小,最大也只有 12% 左右,一般不会满足电流互感器饱和和判据,差动保护可以正确动作。

综合上述仿真结果可见,发生不对称故障时有功功率的二倍频振荡确实会造成逆变器输出电流中出现3次谐波分量,可能造成变压器电流互感器饱和判据满足从而闭锁低值比率差动保护,如果系统短路容量小,则发生区内故障时高值比率差动也可能无法满足导致故障不能切除,仿真结果与理论分析结论相符。

5 结论

本文研究了发生不对称故障时,光伏逆变器输出电流中的3次谐波特性及其对变压器差动保护的影响,主要结论如下:

(1)发生不对称故障时,直流母线电压及有功电流指令值、负序电流指令值中均出现二倍频振荡,该分量流过正、负序控制回路后,最终在逆变器输出电流中产生3次谐波分量;

(2)当电压跌落程度较大,故障前输出有功功率较小,故障后采用控制目标Ⅱ,且逆变器按照低电压穿越要求输出无功电流后还有裕度输出全部有功电流指令值时,逆变器输出的3次谐波含量将比较大,仿真结果表明某些工况下3次谐波含量可达到40%;

(3)变压器区内故障时,由于光伏侧输出3次谐波电流的原因,低值比率差动保护可能被长期闭锁,如果系统侧提供的短路电流也较小,将造成动作电流无法满足高值比率差动保护,区内故障不能切除;

(4)提出了引入电流基波大小及间断角作为3次谐波辅助判据的电流互感器饱和改进谐波判据,提高了变压器区内故障时保护动作的可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] SALEH K A, EL-MOURS M S, ZEINELDIN H H. A new protection scheme considering fault ride through requirements for transmission level interconnected wind parks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1324-1333.
- [2] ZEINELDIN H H, SHARAF H M, IBRAHIM D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 115-123.
- [3] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 适应于双馈风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 123-128.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 123-128.
- [4] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines connected to induction generator-based wind farms during balanced faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1193-1203.
- [5] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [6] EL-NAGGAR A, ERLICH I. Fault current contribution analysis of doubly fed induction generator-based wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 874-882.
- [7] 黄涛, 陆于平, 王业. 考虑撬棒保护的DFIG等效序阻抗研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 160-168.
HUANG Tao, LU Yuping, WANG Ye. Study on equivalent sequence impedances of DFIG with crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 160-168.
- [8] 沈枢, 张沛超, 方陈, 等. 双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 87-92.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 87-92.
- [9] 王晨清, 宋国兵, 迟永宁, 等. 风电系统故障特征分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 52-58.
WANG Chenqing, SONG Guobing, CHI Yongning, et al. Fault characteristics analysis of wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 52-58.
- [10] WEI Wei, ZHANG Luoma, GAO Bingtuan, et al. Frequency inconsistency in DFIG-based wind farm during outgoing transmission line faults and its effect on longitudinal differential protection[C]//The 4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems. Hong Kong, China: IEEE, 2014: 25-30.
- [11] 黄涛. 风电接入对继电保护影响机理及充分时保护新方案研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
HUANG Tao. Study on impact mechanism of wind power integration on protective relaying and new sufficient criterion protection schemes[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2017.
- [12] 熊小伏, 齐晓光, 欧阳金鑫. 双馈风电机组短路电流对变压器保护二次谐波制动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2201-2209.
XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, OUYANG Jinxin. Effect of doubly-fed wind turbines short-circuit current on second harmonic escapement of transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2201-2209.
- [13] 曹太强, 许建平, 徐顺刚. 光伏发电系统SPWM逆变电源谐波的抑制技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 20-22, 49.
CAO Taiqiang, XU Jianping, XU Shungang. Harmonic suppression of SPWM inverter for photovoltaic power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 20-22, 49.
- [14] 郭晓瑞, 王培良, 郭吉丰, 等. 光伏并网逆变器母线电压纹波的分析与控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 48-53.
GUO Xiaorui, WANG Peiliang, GUO Jifeng, et al. Analysis and control of bus voltage ripples for grid-connected photovoltaic inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 48-53.
- [15] 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. Fault current transient features and its related impact factors of PV generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [16] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1660-1668.
- [17] 中国电力科学研究院. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

- [18] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁. 利用测量电流互感器实现配电网故障电流检测的新方法[J]. 电力系统自动化,2001,25(21):51-54.

XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren. Fault current detection method using measurement current transformer for distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21):51-54.

作者简介:

黄涛(1988—),男,湖南新化人,博士,主要研究方向为电力系统继电保护、新能源发电保护与控制(E-mail: huangtao4@nrec.com);



黄涛

王胜利(1978—),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为新能源并网技术、智能电网信息处理(E-mail: xjktgds@126.com);

谢华(1983—),男,江苏启东人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: xiehua@nrec.com);

赵青春(1980—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: zhaoqc@nrec.com)。

(编辑 任思思)

Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection

HUANG Tao¹, WANG Shengli^{2,3}, XIE Hua¹, ZHAO Qingchun¹, GU Qiaogen¹, XU Xiaochun¹, DAI Guangwu¹

(1. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumchi 830002, China)

Abstract: When asymmetric fault occurs in the system, negative-sequence components appear in the short circuit current and voltage, which results in 100 Hz oscillation in the DC bus voltage of photovoltaic inverter. A third harmonic component will be generated in the short circuit current of photovoltaic inverter when this 100 Hz component circulating through the control loop. The analytical expression of third harmonic current of photovoltaic inverter is deduced. The characteristics of third harmonic are analyzed considering the influence of current-limited feature of controller, negative-sequence control strategy and low voltage ride through strategy. Then the influence of third harmonic current on transformer differential protection configured with current transformer saturation criterion is studied. It is pointed that the transformer differential protection may be blocked during internal fault of transformer due to the high third harmonic component in short circuit current, and the corresponding countermeasures are proposed to deal with this problem. A large number of simulative results verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: photovoltaic inverter; third harmonic; current-limited characteristic; negative-sequence control; current transformer saturation; relay protection; transformer differential protection

(上接第91页 continued from page 91)

Day-ahead operation plan for campus distribution network considering uncertainty of photovoltaic output

XU Yin, LI Jiaxu, WANG Ying, LI Chen, HE Jinghan

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Along with the access of massive distributed photovoltaic into distribution network, the uncertainty of its output have become an important factor affecting the safe and operation of distribution network, which should be considered in making day-ahead operation plan. A chance-constrained programming model for day-ahead operation plan of campus distribution network is proposed, which takes the minimum expectation of power purchase cost and voltage offset as its objective. GMM(Gaussian Mixture Model) is used to describe the uncertainty of photovoltaic output, and SAA(Sample Average Approximation) method is adopted to transform the chance constraints which express the probability of voltage over-limit into deterministic constraints, then the chance-constraint programming model is transformed into a deterministic mixed-integer linear programming model. The optimal day-ahead operation plan of distribution network can be obtained by solving the model. The standard IEEE 13-bus system and the campus distribution network of a university in Beijing are taken as examples, and the effectiveness of the proposed model and method is verified.

Key words: distribution network; day-ahead operation plan; uncertainty; Gaussian mixture model; sample average approximation

附录 A

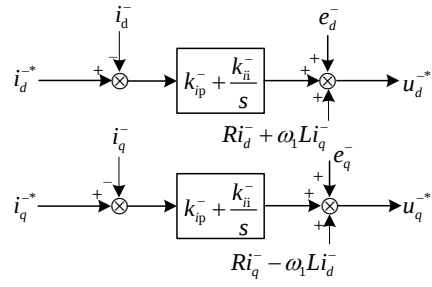


图 A1 负序控制框图

Fig.A1 Control block diagram of negative sequence

附录 B

表 B1 仿真模型参数
Table B1 Parameters of simulation model

参数	参数值
光伏组件额定辐照度/(W m^{-2})	1000
光伏组件额定温度/ $^{\circ}\text{C}$	25
升压变额定容量/MW	120
升压变漏抗/ Ω	j43.5
联络线正序阻抗/ Ω	$2.66+j34.44$
联络线零序阻抗/ Ω	$29.12+j108.64$
系统阻抗最小值/ Ω	j25.133
系统阻抗最大值/ Ω	j62.832

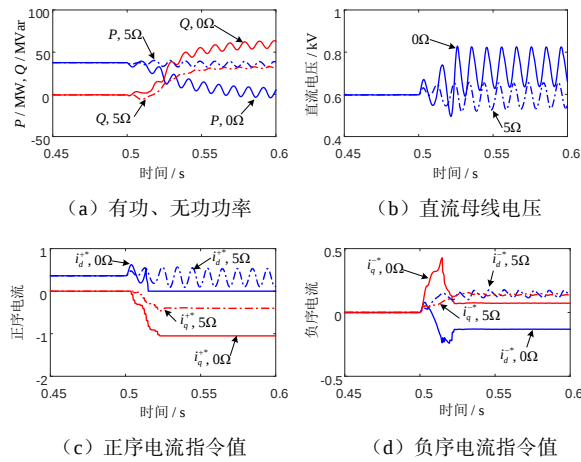


图 B1 仿真工况 2 下逆变器电气量波形
Fig.B1 Electrical waveforms of inverter under Case 2

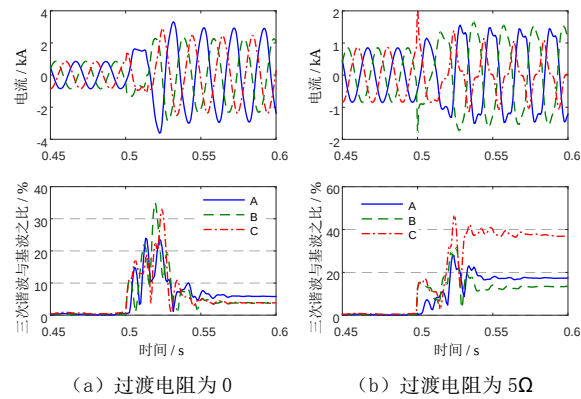


图 B2 仿真工况 2 下升压变低压侧电流 3 次谐波
Fig.B2 Third harmonic currents at low-voltage side of booster transformer under Case 2

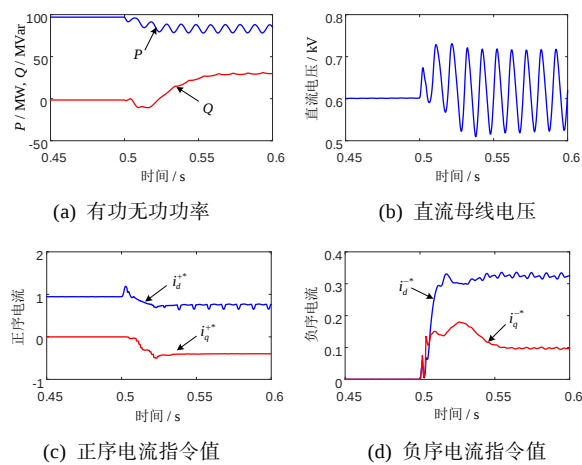


图 B3 仿真工况 3 下逆变器电气量波形
Fig.B3 Electrical waveforms of inverter under Case 3

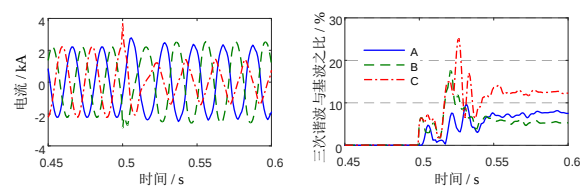


图 B4 仿真工况 3 下升压变低压侧电流 3 次谐波
Fig.B4 Third harmonic currents at low-voltage side of booster transformer under Case 3