

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

刘素梅¹, 毕天姝¹, 王晓阳², 杨国生², 薛安成¹, 杨奇逊¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京市 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要: 新能源电源大规模接入电网背景下, 电网故障特征发生根本性改变, 电网继电保护正面临新挑战。由于新能源电源故障特性与其所用变换器控制紧密相关, 而变换器具体采用的控制策略随生产厂家不同而不同, 一般也不公开, 所以这些因素使得揭示新能源电源短路电流特性成为难题。针对逆变型新能源电源(IIREG), 提出了基于并网逆变器与直流卸荷电路协调控制的故障穿越策略, 确保 IIREG 穿越不对称度 100% 的故障。以此为基础, 分析逆变器控制策略与 IIREG 短路电流特性间关联规律, 进一步从理论上推导出了不依赖逆变器控制结构及参数的 IIREG 稳态短路电流计算公式。最终, 采用硬件在环实验, 验证了所提故障穿越策略与 IIREG 稳态短路电流表达式的有效性和正确性, 同时通过分析故障类型、位置及所接电网短路容量水平对 IIREG 故障电流特性的影响, 揭示了 IIREG 与常规同步电机相比的差异。这为含 IIREG 电网继电保护适应性分析及配置整定研究提供理论支撑。

关键词: 逆变型电源; 故障电流; 不对称故障穿越控制; 风力发电; 光伏发电; 继电保护

0 引言

作为电网安全稳定运行第一道防线, 继电保护的基本任务是电网故障后根据电气量(或非电气量)变化特征, 鉴别和隔离故障元件。目前以同步电机为基础的故障特征分析理论和以工频稳态短路电流为主导的继电保护技术已很成熟。但是, 近来风电和光伏发电等新能源电源大规模接入^[1-3]导致电网故障特征发生根本性改变, 已有电网保护正面临挑战, 这已成为电力企业当前最为棘手和紧迫的问题之一^[4-6]。

为解决新能源电源接入现有电网保护所面临的问题, 需要开展两方面研究: 一是认知并揭示新能源电源故障特性; 二是评估现有电网保护适应性并提出适应新能源电源接入电网保护新原理。其中, 新能源电源故障特性认知是基础。按照接口类型不同, 新能源电源可分为部分功率变换型(双馈风电机组)和全功率变换型(永磁直驱风电机组和光伏电池等)。本文针对全功率变换型电源, 又称逆变型新能源电源(inverter interfaced renewable energy generator, IIREG)短路电流特性开展研究。

但是, 由于 IIREG 故障电流特性与其并网逆变器控制紧密相关, 而逆变器具体所采用控制策略随生产厂商不同而不同, 且一般也并不公开, 这使得 IIREG 短路电流特性研究成为一个难题。目前仅部分文献基于指定的逆变器控制策略研究 IIREG 短路电流特性。

文献[7-8]在考虑逆变器正常并网控制前提下, 分析了 IIREG 故障电流特性, 这是在新能源电源发展初期开展的, 当时电网并未提出故障穿越要求^[9]。而文献[10-12]通过计及故障过程中逆变器暂态控制策略影响, 揭示了 IIREG 对称短路电流特性, 但并未涉及不对称短路电流特性, 这是由于文中逆变器暂态控制并不能有效应用于电网不对称故障场景。针对不对称故障, 文献[13-14]结合改进的逆变器暂态正序控制策略, 分析了 IIREG 不对称故障电流特性; 文献[15]基于单环和双环电流控制器回路结构, 对比分析了其对 IIREG 暂态短路电流的影响, 上述研究所得结论依赖于指定控制策略, 且并不能保障 IIREG 完全满足故障穿越要求。因此, 目前关于 IIREG 不对称短路电流特性认知尚不够全面深入。

为此, 本文首先提出基于并网逆变器与直流卸荷电路协调控制的故障穿越策略, 以满足深度不对称故障下 IIREG 的故障穿越目标; 在此基础上, 通过研究逆变器暂态控制与 IIREG 馈出短路电流特

收稿日期: 2015-03-27; 修回日期: 2015-06-12。

国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB215206); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014QN20); 国家电网公司科技项目(JB71-15-042)。

性之间关联规律,从理论上推导了不依赖逆变器暂态控制的 IIREG 稳态短路电流计算公式;并通过分析电网故障类型和位置、及短路容量等因素对 IIREG 故障电流特性的影响规律,揭示了 IIREG 故障电流特性与常规同步电机相比的差异性,这为含 IIREG 电网继电保护相关研究奠定了基础。

1 不对称故障穿越控制策略研究

研究不对称故障穿越策略,是揭示 IIREG 不对称故障电流的基础。目前已有大量文献专注于研究 IIREG 不对称故障穿越策略,其解决方法主要有两种:一是增加额外电力电子设备,如动态电压恢复器^[16]、储能元件^[17]等;二是改进 IIREG 电源系统本身控制策略。其中,引入额外电力电子器件尽管能够明显减轻电网故障对 IIREG 的影响,但是这将会增加系统制造成本和设计难度。因此,目前实际中多采用改进 IIREG 本身控制的方法。

IIREG 本身控制改进方法主要包括:基于负序电压补偿的矢量定向控制^[18]、正反转同步旋转坐标系下双 DQ 矢量定向控制^[19]和两相静止坐标系下矢量定向控制^[20-22]等,但是它们仅适用电网轻度不对称故障,并未考虑深度故障下同时存在的逆变器过流和直流母线过压问题。为此,下文通过详细分析深度不对称故障对 IIREG 影响,提出可穿越不对称度达 100% 的控制策略,以进一步深入研究逆变器暂态控制与 IIREG 故障电流特性之间关联规律。

1.1 深度不对称故障对 IIREG 影响分析

并网型 IIREG 的拓扑结构如图 1 所示,IIREG 发电单元仅通过逆变器与电网相连。

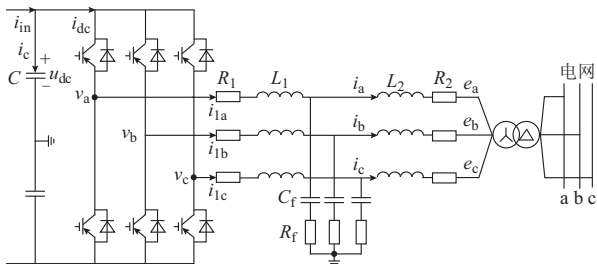


图 1 并网型 IIREG 主电路拓扑结构图

Fig.1 Main topology of a grid-connected IIREG

电网不对称故障下,IIREG 并网处负序电压的存在,使其输出有功和无功功率为:

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = 1.5(P_{\text{out}}^{\circ} + P_{\text{out}}^{\text{c}} \cos 2\omega t + P_{\text{out}}^{\text{s}} \sin 2\omega t) \\ Q_{\text{out}} = 1.5(Q_{\text{out}}^{\circ} + Q_{\text{out}}^{\text{c}} \cos 2\omega t + Q_{\text{out}}^{\text{s}} \sin 2\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{out}° (Q_{out}°), $P_{\text{out}}^{\text{c}}$ ($Q_{\text{out}}^{\text{c}}$), $P_{\text{out}}^{\text{s}}$ ($Q_{\text{out}}^{\text{s}}$) 分别为瞬时有功(无功)功率中包含的直流分量、二倍频余弦和正弦分量的幅值。各分量表达式^[23]为:

$$\begin{cases} P_{\text{out}}^{\circ} = e_d^{\text{p}} i_d^{\text{p}} + e_q^{\text{p}} i_q^{\text{p}} + e_d^{\text{n}} i_d^{\text{n}} + e_q^{\text{n}} i_q^{\text{n}} \\ Q_{\text{out}}^{\circ} = e_d^{\text{p}} i_q^{\text{p}} - e_q^{\text{p}} i_d^{\text{p}} - e_d^{\text{n}} i_q^{\text{n}} + e_q^{\text{n}} i_d^{\text{n}} \\ P_{\text{out}}^{\text{c}} = e_d^{\text{p}} i_d^{\text{n}} + e_q^{\text{p}} i_q^{\text{n}} + e_d^{\text{n}} i_d^{\text{p}} + e_q^{\text{n}} i_q^{\text{p}} = Q_{\text{out}}^{\text{s}} \\ P_{\text{out}}^{\text{s}} = -e_d^{\text{p}} i_q^{\text{n}} + e_q^{\text{p}} i_d^{\text{n}} + e_d^{\text{n}} i_q^{\text{p}} - e_q^{\text{n}} i_d^{\text{p}} = -Q_{\text{out}}^{\text{c}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: e_d^{p} 和 e_q^{p} 为 IIREG 并网处正序电压在正序同步旋转坐标下的 d 轴和 q 轴分量; e_d^{n} 和 e_q^{n} 为并网处负序电压在负序同步旋转坐标下的 d 轴和 q 轴分量; i_d^{p} , i_q^{p} , i_d^{n} 和 i_q^{n} 为流过逆变器正负序电流分别在正负序同步旋转坐标系下的 d 轴和 q 轴分量。

忽略逆变器和 LCL 滤波器的损耗,直流母线上功率平衡方程为:

$$2CU_{\text{dc}} \frac{dU_{\text{dc}}}{dt} = P_{\text{out}} - P_{\text{in}} \quad (3)$$

式中: C , U_{dc} 为直流电容和电压, $P_{\text{in}} = 2U_{\text{dc}} i_{\text{in}}$ 为 IIREG 发电单元输入功率。电网不对称故障下, P_{out} 中二倍频脉动量将导致直流电压周期波动,这会影响到逆变器控制稳定性,同时也会降低电容器寿命。

为此,电网不对称故障下 IIREG 输出功率 P_{out} 二倍频脉动量应通过逆变器控制加以消除。结合式(2),逆变器正负序参考电流 $i_d^{\text{p}*}$, $i_q^{\text{p}*}$, $i_d^{\text{n}*}$, $i_q^{\text{n}*}$ 为:

$$\begin{bmatrix} i_d^{\text{p}*} \\ i_q^{\text{p}*} \\ i_d^{\text{n}*} \\ i_q^{\text{n}*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3D} \begin{bmatrix} e_d^{\text{p}} P_0 - e_q^{\text{p}} Q_0 \\ e_q^{\text{p}} P_0 + e_d^{\text{p}} Q_0 \\ -e_d^{\text{n}} P_0 - e_q^{\text{n}} Q_0 \\ -e_q^{\text{n}} P_0 + e_d^{\text{n}} Q_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: Q_0 为故障下期期望无功功率,其大小由电网故障穿越要求决定。 P_0 为期望有功功率。 $D = (e_d^{\text{p}})^2 + (e_q^{\text{p}})^2 - (e_d^{\text{n}})^2 - (e_q^{\text{n}})^2$, 其与电网故障严重程度相关。电网故障越严重, D 值越小,流过逆变器电流也越大,甚至会超过其最大允许值。因此,流过逆变器电流应限制在一定范围内(本文取 2(标么值))。

但是,限制逆变器电流会导致直流母线上功率过剩,直流电压将不断升高,造成 IIREG 控制系统崩溃。深度不对称故障下实现式(4)控制目标,需同时关注逆变器过流和直流母线过压问题。

1.2 并网逆变器与直流卸荷电路协调控制策略

为解决上节所指问题,本文提出了一种并网逆变器与直流卸荷电路协调控制的故障穿越策略,如图 2 所示。相比传统双 DQ 矢量定向控制策略,所提策略于电流控制回路引入新型电流限幅器,避免深度故障下逆变器过流;也设计了卸荷电路控制器,确保直流电压始终在安全范围内,并能与逆变器控制相协调。

电流限幅器设计解决的关键问题是如何在逆变

器安全运行允许范围内最大程度地发挥其功率调控能力。首先通过下式计算流过逆变器三相瞬时电流：

$$\begin{cases} i_a = |I_{dq}^p| \sin(\omega t + \theta^p) + |I_{dq}^n| \sin(\omega t + \theta^n) \\ i_b = |I_{dq}^p| \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta^p\right) + |I_{dq}^n| \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta^n\right) \\ i_c = |I_{dq}^p| \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta^p\right) + |I_{dq}^n| \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta^n\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $|I_{dq}^k| = |i_d^{k*} + ji_q^{k*}|$ ($k = p, n$) 表示正负序电流矢量参考幅值； ω 为电网角频率； $\theta^n = 2\pi - \arctan(i_q^{n*} / i_d^{n*})$ ， $\theta^p = \arctan(i_q^{p*} / i_d^{p*})$ 分别为正负序电流矢量相角。

进一步地，根据式(5)求得最大电流幅值 I_{max} 。当 I_{max} 超过逆变器最大允许电流 I_{lim} 时，式(4)中正负序电流参考值被重置为：

$$i_j^{k*'} = i_j^{k*} \frac{I_{lim}}{I_{max}} = \alpha i_j^{k*} \quad (6)$$

式中： $j = d, q$ ； α 为电流限制系数。

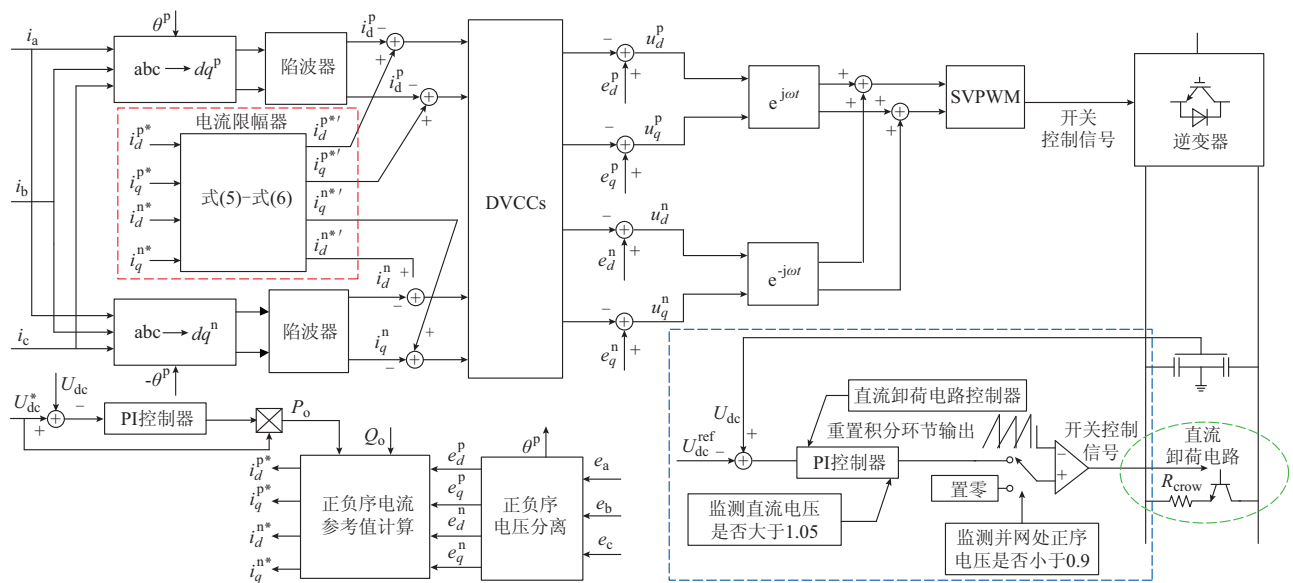


图2 基于并网逆变器与直流卸荷电路协调控制的故障穿越策略
Fig.2 A coordinated control strategy for grid-tie inverter and DC-link chopper

上述电流限幅器应用不仅能有效抑制直流母线电压脉动，同时也在最大程度发挥逆变器调控能力的基础上保障 IIREG 输出标准正弦电流。

另外，为解决直流过压问题，这里提出了新型的直流卸荷电路 PI 控制器，如图 2 右下角蓝色虚线区域所示。当 IIREG 并网处正序电压跌落至 0.9 (标么值) 以下时，PI 控制器启用。为快速抑制直流过压，当实际直流电压大于 1.05 时，PI 控制器积分环节被重置为实际直流电压与其参考值的差值。另外，为配合逆变器控制，PI 控制器输入参考值将设置为与逆变器电压控制回路参考值相同，以保障电网故障/正常情况下卸荷电路电压控制与逆变器电压控制之间平滑切换。

综上所述，本文所提控制策略在同时兼顾逆变器过流和直流母线过压的基础上，最大程度地利用了逆变器的功率调控能力，这样可有效扩大 IIREG

的故障运行范围，有关深度不对称故障下 IIREG 故障穿越能力测试将在文中 4.2 节介绍。

2 IIREG 稳态故障电流推导

由于 IIREG 并网逆变器相关受控电压和电流与电网运行工况紧密相关，所以当电网故障发生后，IIREG 必然存在一个暂态过渡过程。该过程涉及逆变器交流侧电流和直流母线电压等状态量达到一定阈值后不同控制回路切换，以及控制回路中大量非线性元件作用等，难以利用数学表达式加以描述，其所经历时长通常不超过 3~4 个周期。之后，IIREG 将进入故障准稳阶段，其故障电流特性主要受逆变器故障穿越控制目标影响，而与逆变器控制回路结构及相关参数无关，这就为推导不依赖于逆变器控制的 IIREG 稳态短路电流创造了条件。

根据式(4)和式(6)给定的故障穿越控制目标，

可得到 IIREG 馈出正负序短路电流幅值(标么值)为:

$$\begin{cases} I_m^p = |I_{dq}^p| = \frac{|E_{dq}^p| S_o}{(|E_{dq}^p|^2 - |E_{dq}^n|^2)} = \frac{S_o}{(\gamma E_{mN}(1-\beta^2))} \\ I_m^n = |I_{dq}^n| = \frac{|E_{dq}^n| S_o}{(|E_{dq}^p|^2 - |E_{dq}^n|^2)} = \\ \frac{\beta S_o}{(\gamma E_{mN}(1-\beta^2))} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $|E_{dq}^p|$ 和 $|E_{dq}^n|$ 为 IIREG 并网处正序和负序电压幅值; γ 为正序电压跌落系数; $\beta = |E_{dq}^n|/|E_{dq}^p|$ 为电压不对称度; E_{mN} 为故障前并网电压幅值。 S_o 为故障下 IIREG 提供视在功率, 其计算公式为:

$$S_o = \begin{cases} \sqrt{P_o^2 + Q_o^2} & \alpha \geq 1 \\ \alpha \sqrt{P_o^2 + Q_o^2} & \alpha < 1 \end{cases} \quad (8)$$

从式(7)中看出, 故障期间 IIREG 向电网提供负序电流, 这与常规同步电机相比有较大差异。

另外, 结合式(5), 进一步推导得出 IIREG 馈出三相稳态故障电流幅值为:

$$\begin{cases} I_{am} = \left(\frac{S_o}{\gamma E_m^p (1-\beta^2)} \right) \sqrt{1+\beta^2+2\beta\cos\theta_i} \\ I_{bm} = \left(\frac{S_o}{\gamma E_m^p (1-\beta^2)} \right) \sqrt{1+\beta^2+2\beta\cos\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right)} \\ I_{cm} = \left(\frac{S_o}{\gamma E_m^p (1-\beta^2)} \right) \sqrt{1+\beta^2+2\beta\cos\left(\theta_i + \frac{4\pi}{3}\right)} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{am} , I_{bm} 和 I_{cm} 分别为 A 相、B 相和 C 相稳态故障电流。 $\theta_i = \tan^{-1}(e_q^n/e_d^n) - 2\pi$, 与 IIREG 并网处负序电压相角直接相关。 当 θ_i 为 $0, 3\pi/4, 5\pi/4$ 时, A 相、B 相、C 相瞬时电流幅值依次取最大值, 它等于正序和负序电流幅值之和。

由式(9)看出, IIREG 馈出三相稳态短路电流幅值与两方面因素有关: 一是故障穿越期间逆变器功率控制目标, 即实际视在功率 S_o , 其数值大小很容易确定, 主要由新能源电源并网规定和逆变器最大允许电流值决定; 二是 IIREG 并网处正序和负序电压相关量, 它们与所接电网参数及故障情况相关, 在继电保护相关研究中电网参数及故障情况通常是已知的。 式(9)所描述 IIREG 短路电流计算式独立于逆变器所采用控制器类型及参数, 这在一定程度上避开了实际电网故障分析计算时逆变器控制策略无法获知的难题, 为含 IIREG 电网保护整定值计算提供了可能。

3 IIREG 故障穿越测试及短路电流特性分析

3.1 闭环试验平台构成

本文利用如附录 A 图 A1 所示的硬件闭环试验系统, 验证所提不对称故障穿越控制策略及 IIREG 稳态短路电流计算表达式的有效性和正确性, 并进一步分析不同工况下 IIREG 短路电流变化规律。

图 A1 中闭环试验系统由主控制器、脉宽调制(PWM)信号发生器、实时数字仿真(RTDS)系统和后台监控器 4 部分组成, 相关性能指标是按照国标或市场化商业产品标准设计的。 其中, 主控制器采用 DPS+FPGA 结构, 实现 IIREG 相关控制与保护算法, 相关逻辑代码可灵活更改; PWM 信号发生器用于生成变换器控制所需开关信号, 并送入 RTDS 系统; RTDS 系统用于模拟含 IIREG 电网主电路部分; 后台监控器实现 IIREG 启停、模拟量监测、控制与保护参数设定等。

利用上述闭环试验系统, 对图 3 中含 IIREG 的典型拓扑结构电网进行相关试验测试与分析。 其中, 变压器 T2 变比为 10.5/2.2 kV; T1 变比为 121/10.5 kV; 线路 AB, BC 长度分别为 5.5 km, 1.6 km。 IIREG 主电路(如图 1)中逆变器额定容量为 1.5 MW; 直流母线电容 $C = 4\ 500\ \mu\text{F}$, 电压 $U_{dc} = 1.2\ \text{kV}$; LCL 滤波器 $L_1 = 1\ 100\ \mu\text{H}$, $L_2 = 123.55\ \mu\text{H}$, $C_f = 200\ \mu\text{F}$, $R_f = 0.248\ 4\ \Omega$ 。 IIREG 控制部分(见图 2)正负序电流环 PI 控制器比例系数 $K_{ip} = 0.328\ 5$, 积分时间常数 $T_{i1} = 0.017\ 5$; 电压环控制器比例系数 $K_{vp} = 0.75$, 积分时间常数 $T_{v1} = 0.875$ 。

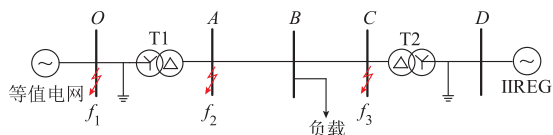


图 3 含 IIREG 的电网拓扑结构
Fig.3 Simulation model of power system with a IIREG

3.2 故障穿越测试

假定 $t = 0.6\ \text{s}$ 时母线 C 处(如图 3 所示)发生 AB 相接地短路故障, 故障持续时间为 0.65 s。 该故障将引起 IIREG 并网处正序电压跌落为 0.57, 负序电压为 0.55。 为了较全面测试分析 IIREG 故障穿越能力, 附录 A 图 A2 和图 A3 为小功率(30% 额定负载)、大功率(100% 额定负载)下 IIREG 分别在所提故障穿越策略、改进型故障穿越控制策略(详见文献[17])、传统双 DQ 矢量控制策略作用下的对比测

试结果。

从附录 A 图 A2(g)–(i) 中看出, 当 IIREG 运行于 30% 额定负载且采用传统双 DQ 矢量控制策略时, 故障发生后流过逆变器的相电流将明显增大, A 相电流始终大于逆变器最大允许电流值 (2.49 kA), 这会导致过流保护动作, IIREG 被迫从电网切除; 同时, 在故障期间中直流母线电压呈较大幅度的 2 倍频振荡 (7%~–15%), 这不利于逆变器控制系统稳定运行。而如附录 A 图 A2(d)–(f) 所示, 改进型故障穿越控制作用时, 尽管故障期间流过逆变器电流相对较小且仅包含正序分量, 但是直流母线电压脉动相对较大 (10%~–18%)。相比之下, 在附录 A 图 A2(a)–(c) 中, 若小功率下采用本文所提策略时, 故障全过程中流过逆变器的相电流均维持在其最大允许值范围内, 直流电压脉动也相对较小 ($\pm 5\%$)。

然而, 当 IIREG 运行于 100% 额定负载且采用传统双 DQ 矢量控制策略时, 如附录 A 图 A3(g)–(i) 所示, 故障期间 IIREG 失稳, 流过逆变器相电流幅值最大达到 7.5 (标幺值), 同时直流电压也大幅脉动, 最大约为 3.75 (标幺值), 此情形下 IIREG 本身过压或过流保护均会动作, IIREG 将脱网。从附录 A 图 A3(d)–(f) 中可看出, 改进型故障穿越策略作用时, 故障期间 IIREG 也失稳, 且在故障切除后 IIREG 无法恢复正常运行。整个故障过程中流过逆变器相电流最大约为 6.5 (标幺值), 直流电压最大约达到 4.08 (标幺值), 同样 IIREG 将会因过流或过压保护动作而脱网。但是, 如附录 A 图 A3(a)–(c) 所示, 若大功率下所提控制策略作用, 故障期间 IIREG 可稳定运行, 直流电压和流过逆变器电流均在安全允许范围内。

因此, 本文所提控制策略能够扩大 IIREG 的故障运行范围, 保障 IIREG 在不对称度达 100% 的故障下安全运行。事实上, 所提策略也可适用于对称故障情况, 由于篇幅限制, 这里将不再详述。

3.3 IIREG 稳态电流验证

为验证本文所提 IIREG 稳态短路电流表达式的正确性, 基于 MATLAB 编写了含 IIREG 电网 (如图 3 所示) 的故障分析计算程序, 将所得计算结果与利用闭环测试系统得到的试验结果进行对比分析。表 1 为母线 C 处发生 AB 相接地故障时, 不同功率控制目标下 IIREG 馈出三相稳态电流计算值与试验值。故障前 IIREG 额定运行, 其输出电流幅值为 1.245 kA。

表 1 不同功率控制目标下 IIREG 馈出短路电流
Table 1 Fault currents of IIREGs with different active and reactive power commands

控制方法	短路电流	试验结果/ kA	计算结果/ kA	相对误差/ %
$P_o=1, Q_o=1$	I_{am}	1.81	1.76	-2.76
	I_{bm}	2.49	2.45	-1.60
	I_{cm}	1.25	1.19	-4.80
$P_o=1, Q_o=0.1$	I_{am}	2.43	2.46	1.23
	I_{bm}	2.49	2.46	-1.22
	I_{cm}	0.31	0.33	6.45
$P_o=0, Q_o=1$	I_{am}	1.50	1.48	-1.33
	I_{bm}	2.49	2.44	-2.05
	I_{cm}	1.55	1.60	3.22

由表 1 可知, 不同功率参考值下, IIREG 馈出三相稳态故障电流幅值的计算结果与试验结果基本一致。其中, $P_o=1$ (标幺值), $Q_o=0.1$ (标幺值) 时, IIREG 输出电流幅值的最大相对误差为 6.45%, 其他情况下电流幅值相对误差均小于 $\pm 5\%$, 这表明式 (9) 所示 IIREG 稳态短路电流表达式具有较高准确度。

另外, 对比不同功率控制目标下 IIREG 馈出三相稳态故障电流幅值的计算或试验结果, 可以发现尽管 3 种功率目标下 B 相电流幅值均达到了逆变器最大允许值, 但是不同功率水平下 A 相和 C 相电流幅值间相互大小关系是不同的。这意味功率控制目标值不仅会影响 IIREG 输出相电流幅值大小, 也会影响相电流幅值间大小关系。该特性与常规同步发电机相比有较大差异。同步电机故障电流主要受其等值阻抗影响, 而与发电机本身有功和无功注入量并不相关。

3.4 IIREG 故障电流随外部电网因素的变化规律

如前文所述, IIREG 馈出稳态短路电流不仅与故障期间功率控制目标密切相关, 还与其并网处正负序电压有关。而 IIREG 并网处电压主要受故障类型、位置及电网等值短路水平等影响。以下通过分析不同故障情况及电网等值参数下 IIREG 稳态短路电流变化规律, 揭示 IIREG 与同步发电机的差异性。

1) 不同故障类型

为对比不同类型故障下 IIREG 馈出短路电流的变化规律, 设定 $t=0.6$ s 时图 3 所示母线 C 处发生两相相间、两相接地和单相接地故障, 故障持续时间均为 0.65 s, 故障期间有功和无功功率控制目标分别为 $P_o=1, Q_o=0.1$ 。故障前 IIREG 额定运行。图 4 为不同故障下 IIREG 输出短路电流曲线。

对比图 4(a)–(c) 中曲线可发现, AB 相间和 AB 相接地故障下 IIREG 馈出短路电流相比故障前发生了较大变化, 且两种故障下 IIREG 输出三相电

流变化规律基本一致, B相电流达到了最大值(2.49 kA), A相电流约为2.43 kA, C相电流小于故障前稳态值。但是, A相接地故障下, 由于IIREG并网变压器T2采用三角形/星形接地接线方式, IIREG并网处电压未发生变化, 其馈出电流几乎保持与故障前相同。

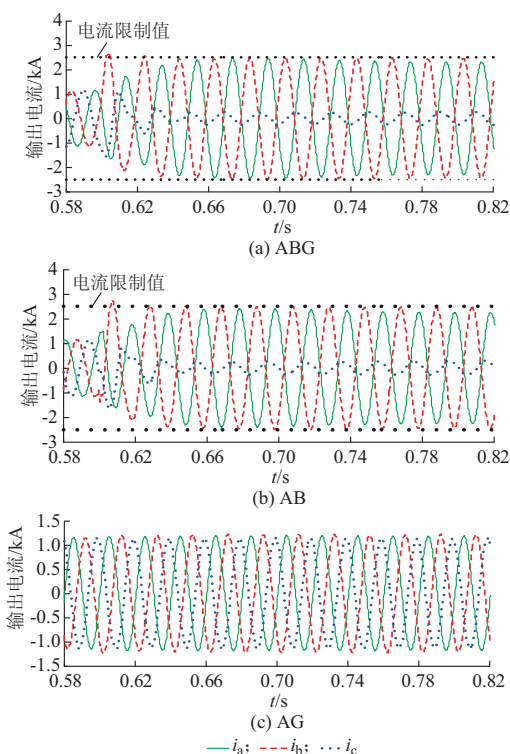


图4 不同故障类型下IIREG故障电流变化曲线
Fig.4 Fault current of the IIREG with various fault types

综上所述, 尽管不同故障类型下IIREG馈出三相短路电流变化规律与常规同步电机有些类似, 即故障相电流较大, 但区别于常规同步发电机, 不对称故障期间IIREG会同时输出正序和负序电流。这意味着在电网保护整定计算中利用常规同步发电机的不对称故障分析模型等值IIREG是不合理的。

2) 不同故障位置

为讨论不同故障位置下IIREG馈出短路电流变化规律, 假定图3所示含IIREG电网母线C, A, O处分别发生A相接地故障, 故障发生时刻和持续时间如前所述, 故障期间功率参考值均为 $P_r=1$, $Q_r=0.1$ 。故障前IIREG额定运行。图4(c)和图5为不同故障下IIREG馈出短路电流曲线。

从图5(a)和图4(c)中看出, 当母线A, C处发生单相接地故障时, IIREG馈出短路电流相比故障前几乎未发生变化。而如图5(b)所示, 在离IIREG较远的母线O处发生A相接地故障时, IIREG馈出

故障电流发生了较大变化, 其中C相电流幅值由故障前1.22 kA增加至2.39 kA。这意味着靠近电网侧发生故障时, 电网对IIREG的电压支撑能力减弱, 从而使IIREG所提供故障电流增大。另外, 母线O处发生A相接地故障时, IIREG输出电流中非故障相C相电流最大, 这是由于故障点和IIREG之间变压器相位偏移所致。如式(9)所示故障下IIREG输出三相电流幅值大小关系只与其出口处负序电压相角有关。

因此, IIREG馈出短路电流受故障位置影响, 这决定了IIREG故障等值电路正负序参数也受故障位置影响, 但同步发电机故障等值正负序参数与电网故障情况关联很小。

3) 所接电网短路容量

为讨论电网短路容量对IIREG馈出故障电流的影响, 设定图3中母线O处发生A相接地故障, 故障发生及持续时间如前所述。上述故障下, 3种不同电网短路容量(SCC)分别向故障点提供的A相短路电流为8.69 kA(SCC1), 6.36 kA(SCC2), 3.01 kA(SCC3)。故障前IIREG额定运行, 故障期间 $P_r=1$, $Q_r=0.1$ 。图6和图5(b)为IIREG故障电流变化曲线。

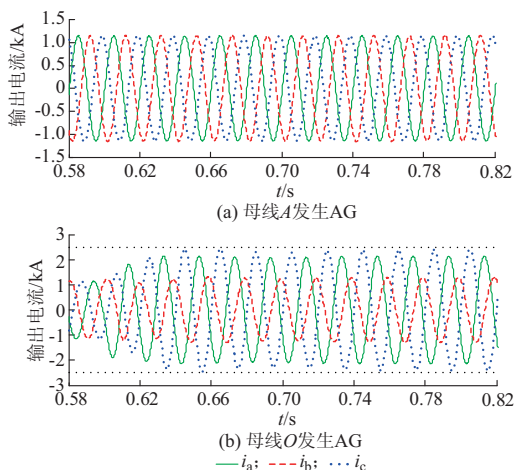


图5 不同故障位置下IIREG输出电流变化曲线
Fig.5 Fault current of the IIREG under the fault locations

对比图6和图5(b)中电流曲线可发现, 电网短路容量越小, IIREG提供故障电流越大。在图6(b)中, 当电网短路容量为SCC3时, IIREG馈出C相电流达到了其最大值(2.49 kA)。而如图6(a)当电网短路容量为SCC1时, IIREG馈出C相电流约为1.85 kA。在图5(b)中当短路容量为SCC2时, C相电流约为2.39 kA。

电网短路容量之所以会影响IIREG馈出故障

电流主要受并网处电压所牵制。根据式(9), IIREG故障电流与其并网处正负序电压间呈非线性关系, 因此常规电网故障对称分量分析方法将不适用。

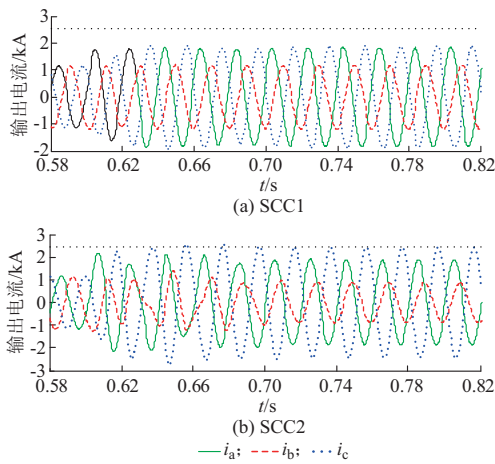


图6 不同等值电网短路水平下 IIREG 故障电流
Fig.6 Fault current of the IIREG under the different SCC

4 结语

本文以 IIREG 为研究对象, 针对目前故障穿越控制策略在深度不对称故障下存在的逆变器过流和直流母线过压问题, 提出了基于并网逆变器与直流卸荷电路协调控制的故障穿越策略。在此基础上, 分析了逆变器暂态控制与 IIREG 馈出短路电流特性间关联规律, 从理论上推导了不依赖逆变器控制策略的 IIREG 稳态短路电流计算公式, 该稳态故障电流的变化规律及特性如下。

1) 区别于常规同步发电机, 不对称故障下具有故障穿越能力 IIREG 会同时输出正序和负序电流, 因此, 利用常规同步发电机不对称故障模型等值 IIREG 是不合理的。

2) 稳态短路相电流幅值由故障期间经逆变器流入电网视在功率(与故障穿越要求的功率控制目标值和逆变器最大允许电流值有关)和并网处正序和负序电压量(与所接电网参数及故障情况有关)决定。

3) 若电网故障及其等值短路容量已知, IIREG 稳态短路相电流幅值与经逆变器流入电网的视在功率成正比例关系, 其最大值将不超过逆变器电流允许值(一般为 1.5 或 2);

以上结论能够为含 IIREG 电网现有保护适应性分析及保护整定值计算提供理论支撑。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 国家能源局. 风电发展“十二五”规划[R]. 2012.
- [2] 国家能源局. 太阳能发电发展“十二五”规划[R]. 2012.
- [3] TAN Zhongfu, NGAN H W, WU Yang, et al. Potential and policy issues for sustainable development of wind power in China [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(3): 204-215.
- [4] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 41-44.
LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbine' trip-off from grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.
- [5] HE Shien, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Impacts of large scale wind power grid integration on relay protection and countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems (in Chinese), 2012, 36(8): 136-142.
- [6] YUAN Xiaoming. Overview of problems in large-scale wind integrations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22-25.
- [7] NIMPITIWAN N, HEYDT G T, AYYANAR R, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 634-641.
- [8] BARAN M E, EI-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generator [J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [9] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [10] HOOSHYAR H, BARAN M E. Fault analysis on distribution feeders with high penetration of PV systems[J]. IEEE Trans on Power System, 2013, 28(3): 2890-2896.
- [11] MULJADI E, SAMAN N, GEVORGIAN V, et al. Short circuit current contribution for different wind turbine generator types[C]// IEEE PES General Meeting, Minneapolis, USA, 2010.
- [12] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 计及逆变型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.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI haifeng, et al. Fault characteristics analysis of distribution networks considering control scheme of inverter interfaced distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92-96.
- [13] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型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 on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [14] FISCHER M, MENDONCA A. Representation of variable speed full conversion wind energy converters for steady state short-circuit calculations[C]// IEEE PES General Meeting, July 24-29, Minneapolis, USA, 2011.
- [15] DARWISHA A, ABDEL-KHALIK B A S, ELSEROUIGIB A, et al. Fault current contribution scenarios for grid-connected voltage source inverter-based distributed generation with an

- LCL filter[J]. *Electric Power Systems Research*, 2013(104): 93-103.
- [16] HUANG P H, El MOURSI M S, XIAO W D, et al. Fault ride-through configuration and transient management scheme for self-excited induction generator-based wind turbine [J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2014, 5(1): 148-159.
- [17] 姚骏,陈西寅,夏先锋,等.含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统低电压穿越控制策略[J].*电力系统自动化*,2012,36(13): 38-44.
- YAO Jun, CHEN Xiyan, XIA Xianfeng, et al. A low voltage ride-through control strategy for direct-driven permanent magnet wind power generation system with flywheel energy storage unit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(13): 38-44.
- [18] RIOUAL P, POULIQUEN H, LOUIS J P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model [J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1996, 11(3): 497-505.
- [19] 陈亚爱,刘劲东,周京华.太阳能并网逆变器故障穿越控制策略[J].*中国电机工程学报*,2014,34(21):3405-3412.
- CHEN Yaai, LIU Jingdong, ZHOU Jinghua. Fault ride-through control strategy for solar grid-connected inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(21): 3405-3412.
- [20] HU J B, HE Y K. Modeling and control of grid-connected voltage-sourced converters under generalized unbalanced operation conditions[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2008, 23(3): 903-913.
- [21] GONG Wenming, HU Shuju, SHAN M, et al. Robust current control design of a three phase voltage source converter[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, 2(1): 16-22.
- [22] 郭小强,贾晓瑜,王怀宝,等.三相并网逆变器静止坐标系零稳态误差电流控制分析及在线切换控制研究[J].*电工技术学报*, 2015,30(4):8-14.
- GUO Xiaoqiang, JIA Xiaoyu, WANG Huaibao, et al. Analysis and online transfer of stationary frame zero steady-state error current control for three-phase grid-connected inverters [J]. *Transactions of China Electro technical Society*, 2015, 30(4): 8-14.
- [23] YONGSUG S, LIPO T A. Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1530-1540.

刘素梅(1981—),女,博士,主要研究方向:新能源电源控制、适应新能源电源接入的电网保护技术。E-mail: s.m.liu@163.com

毕天姝(1973—),女,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与控制、WAMS应用、人工智能在电力系统中应用和故障诊断。E-mail: tsbi@ncepu.edu.cn

王晓阳(1980—),男,硕士,主要研究方向:电力系统继电保护与运行和分布式电源相关技术。

(编辑 代长振)

Fault Current Characteristics of Inverter Interfaced Renewable Energy Generators with Asymmetrical Fault Ride-through Capability

LIU Sumei¹, BI Tianshu¹, WANG Xiaoyang², YANG Guosheng², XUE Ancheng¹, YANG Qixun¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With the increasing penetration of renewable energy generators (REGs) the fault current characteristics of the grid are greatly altered by large-scale REGs. Traditional relay protection schemes are being challenged. The study on the fault characteristics of REGs depends on the employed converter's control strategies employed, but these strategies differ from manufacturer to manufacturer and are seldom, if ever, made public. As a result, how to reveal the fault current characteristics has become a quite difficult problem. In this paper, focus is on the inverter-interfaced REGs (IIREGs). A coordinated control strategy for grid-tie inverter and DC-link chopper is firstly proposed to ensure IIREGs can ride through severer asymmetrical faults (the imbalance degree is about 100%). On the basis of this, the correlation between the inverter's control strategies and the IIREGs' fault current characteristics is analyzed. Further, the expression of the steady fault current from IIREGs is derived theoretically, which is independent of the inverter's control structures and its parameters. Finally, based on the experimental test bench, both the FRT capability and the short-circuit current expression of IIREG are verified. Moreover, by studying the fault current characteristics of IIREGs as influenced by various fault types and locations as well as short-circuit capacity level of the connected grid, the differences between IIREGs and synchronous generators are revealed. The results can be used for evaluating existing relay protection strategies and developing protection configuration and setting principles.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215206), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014QN20) and State Grid Corporation of China (No. JB71-15-042).

Key words: inverter-interfaced renewable energy generator; fault current; asymmetrical fault ride-through control; wind power; photovoltaic power generation; relay protection