

# 配电网合环操作后分布式电源冲击电流的分析与抑制

李美依<sup>1</sup> 黄文焘<sup>1</sup> 邵能灵<sup>1</sup> 陈振宇<sup>2</sup> 杨斌<sup>2</sup> 阮文骏<sup>2</sup>

( 1. 上海交通大学电气工程系 上海 200240

2 国网江苏省电力有限公司 南京 210024 )

**摘要** 配电网中分布式电源 ( Distributed generator, DG ) 渗透率增加势必对配电网合环造成影响。已有研究主要针对分布式电源接入对配网合环操作后稳定运行的影响, 忽略了分布式电源暂态以及动态特性, 并未充分利用控制系统对合环冲击进行抑制。本文考虑 DG 在不同控制策略下输出外特性, 给出了 DG 在配电网合环操作时的冲击电流, 并提出了一种适用于电压源型和电流源型 DG 的统一合环冲击电流抑制策略。该策略通过阶段性调节控制参数使合环电流不超过阈值, 同时, 调节过程自适应选取在冲击电流最小时进行, 以减小控制参数变化对 DG 输出的影响。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 对所提策略进行了验证, 结果表明, 所提策略可以有效抑制合环操作的冲击影响。

**关键词:** 分布式电源 合环操作 冲击电流 抑制策略

**中图分类号:** TM711

## Analysis and Limit Strategy of the Surge Current Caused by Closing-Loop Operation in the DG dominated Distribution Network

Meiyi Li<sup>1</sup> Wentao Huang<sup>1</sup> Nengling Tai<sup>1</sup> Zhenyu Chen<sup>2</sup> Bin Yang<sup>2</sup> Wenjun Ruan<sup>2</sup>

( 1. School of Electrical Engineering Shanghai Jiao Tong University Shanghai 200240 China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Jiangsu 210024 China )

**Abstract** With the increase of the permeability of Distributed Generator (DG) in distribution network, it will inevitably affect the closure of distribution network. Previous studies have mainly studied the effect of DGs on the closed-loop operation, neglecting the transient and dynamic characteristics of DGs. Considering the output characteristics of DGs under different control strategies, this paper presents the surge current of DGs after closed-loop operation of the distribution network. A unified surge current limit strategy for voltage-source and current-source DG is proposed. The control

parameters are adjusted when the impulse current is minimum in order to reduce the influence of the change of control parameters on the output of DG. The proposed strategy is validated based on PSCAD/EMTDC. The results show that the proposed strategy can effectively limit the surge current.

**Keywords:** Distributed Generator (DG), Closing-Loop Operation, Surge Current, Limit Strategy

## 0 引言

分布式电源 (Distributed generator, DG) 是可再生能源在配电网中的重要应用, 具有运行灵活、绿色环保等优点<sup>[1]</sup>。随着分布式发电技术日趋成熟, 其在配电网中的渗透率不断上升。另一方面, 大量 DG 接入使得配电网由单电源供电变成了双电源甚至多电源供电, 将改变系统的潮流分布和短路电流水平<sup>[2]</sup>。DG 及其接入配网系统运行特性的研究正逐渐成为分布式发电产业和电力领域共同关心的重要课题之一<sup>[3]</sup>。

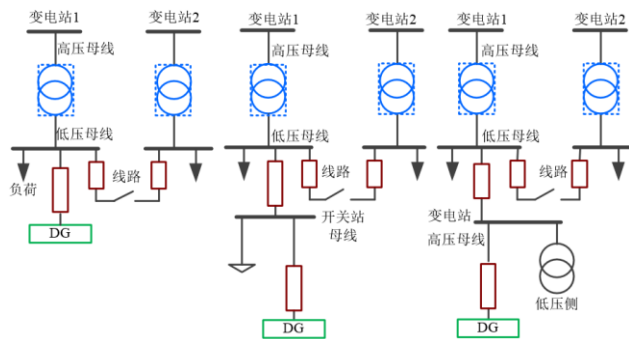
中国配电网通常采用闭环设计、开环运行的供电方式, 当配电网进行网络重构、负荷转移或者设备检修时, 可通过配电网合环操作转移负荷, 提高供电可靠性。随着大量 DG 并入配电网, 势必对配电网合环造成影响。文献[4]针对 DG 输出处 PV 节点转换困难的问题, 提出快速网络搜索法计算网络潮流, 为合环前后稳态电流计算提供了工具。但分析以稳态潮流计算为主, 忽略了分布式电源暂态以及动态特性, 对合环后冲击电流分析较少。为了降低合环对网络冲击, 文献[5]推导了含 DG 的配网合环电流, 并分析指出采用调整变压器分接头、无功补偿装置等方法, 可以实现合环潮流优化控制。考虑配网经济运行指标, 文献[6]建立了多约束的配电网合环最优运行模型, 以消除合环引起的冲击电流和循环电流。但上述冲击抑制方法忽略了控制方案对 DG 输出的影响。实际运行中控制系统对 DG 输出端口处的电压、频率变化过程影响显著, 因此可以充分利用 DG 控制的灵活性<sup>[7]</sup>, 通过控制策略对合环冲击进行抑制。

基于不同输出外特性的 DG, 本文提出了统一合环冲击电流抑制策略, 通过阶段性调节控制参数以减小合环冲击。通过对含 DG 的配电网建模, 本文给出了典型电压源型和电流源型 DG 合环后的冲击电流计算方法。基于对合环冲击电流的计算, 本文提出了一种适用于电压源型和电流源型 DG 的统一合环冲击电流抑制策略。该策略可以自适应调节控制参数使合环电流不超过阈值, 同时, 调节过程选取在冲击电流最小时进行, 以减小控制参数变化

对 DG 输出的影响。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 本文搭建了仿真模型, 对所提控制策略进行了验证。

## 1 含 DG 的配电网合环电流分析建模

### 1.1 DG 典型接入方式



(a) 直接接入 (b) 开关站接入 (c) 变电站并入

图 1 DG 典型接入方式

Fig.1 Typical connecting schemes of DGs

目前 DG 并网大多数通过中、低压接入, 根据国家电网公司 DG 接入电网技术规定, 国内配电网中连接的 DG 主要是在 110kV 变电站的 10kV 或 35kV 母线上接入, 典型方案如图 1 所示, 包括: 1) 以专线直接接入公共电网低(中)压侧母线; 2) 经系统开关站后再并入系统变电站低(中)压侧母线; 3) 经 35kV、110kV 变电站后, 其中高压侧环进环出, 最终并入系统变电站低(中)压侧母线。

### 1.2 含 DG 的配电网建模

根据 DG 接入配网系统三种典型接线, 给出合环电流分析基本模型, 如图 2 所示。模型中支路 1 和支路 2 为合环两侧电源支路, 阻抗主要包括变压器电抗以及线路阻抗, 支路 3 为 DG 所在支路, 这里将 DG 等效为一个受控电源。支路 4 为合环支路。支路 5 和支路 6 为等效负荷支路。

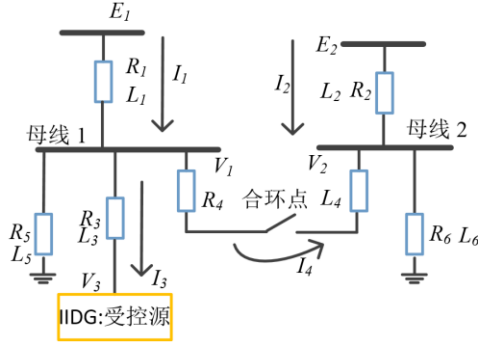


图 2 合环电流分析的基本等效模型

Fig.2 Distribution network model

## 2 合环电流分析计算

### 2.1 配网合环电流计算

配电网合环时，由于网络中电感元件的存在，合环电流不但有周期分量，也有为保持电流不发生突变的非周期分量。合环后合环支路全电流表达式为<sup>[8]</sup>：

$$i_4 = I_{m,4} \sin(\omega t + \varphi_4) + I_c \sin(\alpha - \beta) e^{-\frac{t-t_c}{T_c}} \quad (1)$$

式中： $I_c$  表示合环点由联络开关两侧电压差引起的稳态环流的幅值， $\alpha$  为合环时联络开关两侧电压的相角差， $\beta$  为合环回路阻抗角， $t_c$  为合环时刻， $T_c$  为非周期分量衰减时间常数。 $I_{m,4}$  和  $\varphi_4$  表示合环处合环后的稳态电流幅值以及初始相角。

网络合环后，流过合环支路的冲击电流会分布到非合环支路，非合环支路电流  $i_k$  等于原支路电流与冲击电流的叠加：

$$i_k = I_{m,k} \sin(\omega t + \varphi_k) + c_k e^{-\frac{t-t_c}{T_k}} \quad (2)$$

$$c_k = I_{m,k,0} \sin(\omega t_c + \varphi_{k,0}) - I_{m,k} \sin(\omega t_c + \varphi_k) \quad (3)$$

式中： $I_{m,k}$  和  $\varphi_k$  表示合环后支路  $k$  的稳态电流幅值以及初始相角。 $T_k$  和  $c_k$  为非周期分量衰减时间常数和初始值。

故合环后母线 1 的电压  $v_1$  如公式 (4) 所示。式中  $E_1$  和  $\theta_1$  为合环处前段电源稳态幅值以及初始相角， $L_1$ ， $R_1$ ， $Z_1$  和  $\varphi_z$  为支路 1 的电感电阻阻抗以及阻抗角。 $V_{m,1}$  和  $\delta_1$  为合环后母线 1 电压的稳态幅值以及初始相角。

$$\begin{aligned} v_1 &= e_1 - L_1 \dot{i}_1 - i_1 R_1 \\ &= E_1 \sin(\omega t + \theta_1) - I_{m,1} Z_1 \sin(\omega t + \varphi_z) \\ &\quad + (L_1 - R_1 c_1) \frac{c_1}{T_1} e^{-\frac{t-t_c}{T_1}} \\ &= V_{m,1} \sin(\omega t + \delta_1) + (L_1 - R_1 c_1) \frac{c_1}{T_1} e^{-\frac{t-t_c}{T_1}} \end{aligned} \quad (4)$$

### 2.2 DG 合环电流分析计算

与一般非合环支路不同，DG 输出特性由控制策略决定。根据外特性不同，DG 可以分为受控电流源与受控电压源。以下分别以典型的 PQ 控制下的电流源型 DG 和下垂控制以及虚拟同步电机控制下的电压源型 DG 为例，进行合环电流分析计算。分析中忽略 DG 出口电感对电流的阻滞作用，认为 DG 通过恒定电抗  $Z_3$  并网；同时，认为控制系统具有良好的跟踪性，忽略电压电流内环控制的暂态过程。

#### 2.2.1 PQ 控制

典型 PQ 控制框图如图 3 所示，控制方程为式 (5)。

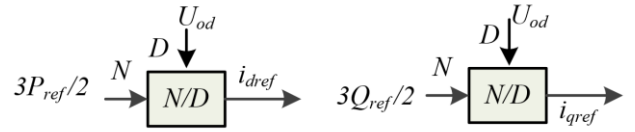


图 3 PQ 控制框图

Fig.3 PQ controller.

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{2}{3} u_d i_d \\ Q_{ref} = \frac{2}{3} u_d i_q \end{cases} \quad (5)$$

若 DG 采取 PQ 控制，则可以将 DG 等效为一受控电流源，即，其输出有功功率保持不变，其输出电流由控制方式决定，受控于输出电压；而 DG 输出电压则由电路方程决定。

$k=1$  时，作为受控电流源，DG 输出电流不会发生突变，即  $i_3(t_1) = i_{3,0}(t_1)$ ，则根据电路理论，DG 输出电压为：

$$v_3(t_1) = i_{3,0}(t_1) Z_3 + v_1(t_1) \quad (6)$$

DG 输出电压将会作为反馈进入控制系统，由于控制中对电压电流测量值进行 ABC 坐标轴向 DQ0 坐标轴转换时，可以滤去直流分量，则 DG 控制中引入的各个反馈量均不含有非周期分量，则 DQ0 坐标下电压为：

$$\begin{aligned}
u_d(t_k) = & \sqrt{\frac{3}{2}} \{ \cos \theta * [V_{m,1} \sin(\omega t_k + \delta_1) + i_{3a}(t_k) Z_3] \\
& + [-\frac{1}{2} \cos \theta + \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \theta] * [V_{m,1} \sin(\omega t_k + \delta_1 - 120^\circ) + i_{3b}(t_k) Z_3] \\
& + [-\frac{1}{2} \cos \theta - \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \theta] * [V_{m,1} \sin(\omega t_k + \delta_1 + 120^\circ) + i_{3c}(t_k) Z_3] \}
\end{aligned} \quad (7)$$

k>1 时,上一时刻测量的电压值作为反馈进入控制系统,得到 DG 输出电流瞬时值为:

$$i_3(t_k) = \sqrt{\frac{3}{2}} \left[ \frac{P_{ref}}{u_d(t_{k-1})} \cos \theta - \sin \theta \frac{Q_{ref}}{u_d(t_{k-1})} \right] \quad (8)$$

### 2.2.2 虚拟同步电机控制

若 DG 中配有储能设备,可以采用虚拟同步电机(VSG)控制策略。控制框图如图 4,控制方程如式(9)。

$$\begin{cases} 2H \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P - D(\omega - \omega_{ref}) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ E = E_{set} + D_Q(Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (9)$$

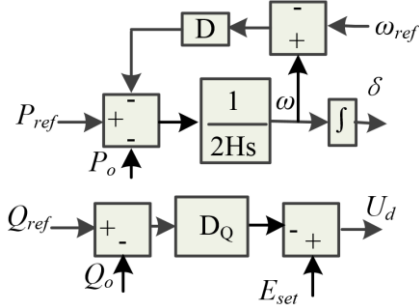


图4 VSG 控制框图

Fig.4 VSG controller.

与 PQ 控制不同,虚拟同步电机控制下 DG 为等效受控电压源,即算法控制的是 DG 出口电压。即其输出电压由控制方式决定,受控于输出功率以及角频率;而 DG 输出电流则由电路方程决定。

k=1 时,作为受控电压源,VSG-DG 出口电压不会发生突变,电压幅值与相角仍为合环前的数值,即  $v_3(t_1) = v_{3,0}(t_1)$ 。则 DG 输出电流:

$$i_3(t_1) = [v_{3,0}(t_1) - v_1(t_1)] / Z_3 \quad (10)$$

考虑控制系统引入的功率测量值可以滤去非周期分量,滤去直流分量后的有功功率和无功率计算式为:

$$\begin{cases} P_o(t_k) = V_{m,3,0}^2 G - V_{m,3,0} V_{m,1} G \cos(\delta') + V_{m,3,0} V_{m,1} B \sin(\delta') \\ Q_o(t_k) = V_{m,3,0}^2 B - V_{m,3,0} V_{m,1} B \cos(\delta') + V_{m,3,0} V_{m,1} G \sin(\delta') \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\delta' = \delta(t_k) - \delta_1$

k>1 时,上一时刻测量的功率以及相角将会作为反馈进入控制系统,根据控制方程可以求得此时 DG 出口电压幅值以及相角:

$$\begin{cases} V_{m,3}(t_k) = E_{set} - D_Q Q_o(t_{k-1}) \\ \omega(t_k) = \omega(t_{k-1}) + \frac{[P_{ref} - P_o(t_{k-1}) - D(\omega(t_{k-1}) - \omega_{ref})] \Delta t}{2H} \Delta t \\ \delta(t_k) = \delta(t_{k-1}) + \omega(t_k) \Delta t \end{cases} \quad (12)$$

最后,根据下式可以求得 DG 输出电流。

$$i_3(t_k) = [V_{m,3}(t_k) \sin(\delta(t_k)) - v_1(t_k)] / Z_3 \quad (13)$$

### 2.2.3 下垂控制

下垂控制的 DG 也是一种典型电压源型 DG,如图 5 所示。下垂控制方程为式(14)所示。

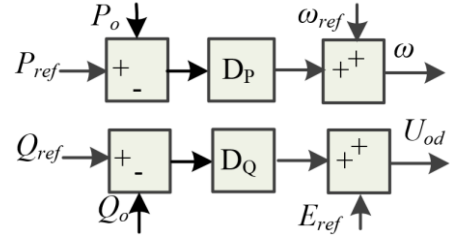


图5 下垂控制框图

Fig.5 Droop controller.

$$\begin{cases} \omega - \omega_{ref} = D_P (P_{ref} - P) \\ E - E_{ref} = D_Q (Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (14)$$

与虚拟同步电机控制下 DG 类似,k=1 时,作为受控电压源,DG 出口电压不会发生突变,即  $v_3(t_1) = v_{3,0}(t_1)$ 。则 DG 输出电流以及功率值可用式(10) - (11) 求取。

k>1 时,上一时刻测量值作为反馈进入控制系统,根据控制方程可以求得此时 DG 出口电压幅值以及角频率:

$$\begin{cases} E(t_k) = D_Q (Q_{ref} - Q(t_{k-1})) + E_{set} \\ \omega(t_k) = D_P (P_{ref} - P(t_{k-1})) + \omega_{ref} \end{cases} \quad (15)$$

根据式(13),类似求得 DG 输出电流。

综上,对于不同输出特性 DG,其合环电流求解思路有所不同。表 1 对比了电流源型以及电压源型 DG 合环电流求解思路。其中电流源型 DG 合环瞬间 DG

输出电流不会发生突变,其输出电压由电路方程决定,输出电流由控制方程决定;而对于电压源型 DG,由于合环瞬间 DG 输出电压不会突变,合环电流求解思路为:根据线路方程求解 DG 输出电流,再根据母线 1 电压以及控制方程求取 DG 输出电压。

表 1 电流源型以及电压源型 DG 合环电流

Tab.1 Surge Current Calculating Method	
逆变器类型	输出电流计算方法
电压型	$V_1$ 变 ( $I_3$ 不变) $\rightarrow V_3$ 变 (电路方程) $\rightarrow I_3$ 变 (控制方程)
电流型	$V_1$ 变 ( $V_3$ 不变) $\rightarrow I_3$ 变 (电路方程) $\rightarrow V_3$ 变 (控制方程)

### 3 DG 合环电流缓冲控制策略

由以上分析可知,在合环瞬间,DG 输出电流会骤增形成冲击电流,影响电网的安全稳定运行。针对电流源型以及电压源型两种不同外特性的 DG,本文提出统一化的 DG 合环电流缓冲控制策略,如图 6 所示。

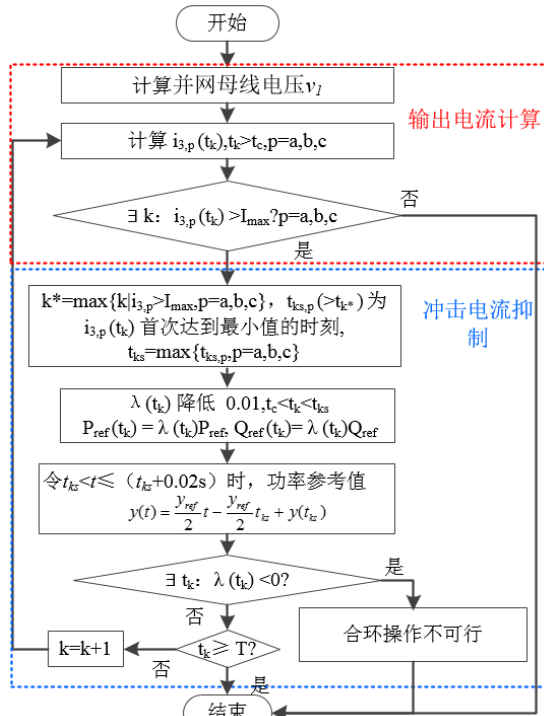


图 6 冲击电流抑制流程图

Fig.6 Algorithm diagram of the limit strategy.

步骤 1: DG 输出电流计算。根据不同控制策略以及 DG 输出特性计算 DG 冲击电流,如若存在某时刻某相瞬时电流值大于阈值,进入步骤 2 实施冲击电流控制算法。

步骤 2: 冲击电流抑制。记录 DG 冲击电流大于阈值的最大时刻  $t_k^*$ ,在  $t_k^*$  时刻后寻找冲击电流首次达到最小值的时刻  $t_{k*}$ ,将  $t_c$  至  $t_{k*}$  间控制参数  $\lambda(t_k)$  降低 0.01,其中  $\lambda(t_k)$  为一个功率因子,  $P_{ref}(t_k) = \lambda(t_k)P_{ref}$  并且  $Q_{ref}(t_k) = \lambda(t_k)Q_{ref}$ ,同时调整将  $t_k$  后一个周期的  $\lambda(t_k)$ ,使其平缓上升。

若参数调整后,导致控制参数  $P_{ref}$  或  $Q_{ref}$  小于零,说明控制参数调整至零仍不满足合环条件。这表明 DG 稳态电流值与阈值电流差距较小,系统中微小波动都造成 DG 输出暂态电流超出阈值的情况,因此,这种情况下,仍不允许合环。

若未出现控制参数小于零的情况,则返回步骤 1,即根据更新后的控制参数重新计算 DG 冲击电流  $i_{3,p}(t_k)$  ( $p=a,b,c$ )。这里选择在冲击电流最小时对控制参数进行调整,是为了尽可能减小参数变动对 DG 输出造成的影响,降低输出波动。

图 7 给出了冲击电流控制调整的一个例子,最初冲击电流如图 7(a) 所示,由于存在冲击电流大于阈值的情况,故在冲击电流大于阈值的最大时刻后,找到冲击电流首次达到最小值,将时段内功率参考值减小为  $\lambda(t_k)=0.99$ 。将该控制参数代入重新计算,得到冲击电流如图 7(b) 所示。由于存在时刻控制参数由 0.99 增至 1,因此该时刻后冲击电流将会叠加一个新的波动。同时,由图可见,由于冲击电流抑制不足,仍存在一段时间内冲击电流大于阈值电流的情况,因此继续降低控制参数  $\lambda(t_k)=0.98$ ,重新计算得到冲击电流如图 7(c)。此时,冲击电流得到充分抑制,但由于控制参数变动引起电流波动超过阈值电流,因此,仍需要降低控制参数  $\lambda(t_k)=0.97$ 。重新计算得到冲击电流如图 7(d),此时,任一时刻冲击电流均小于阈值电流,合环冲击得到全面控制。

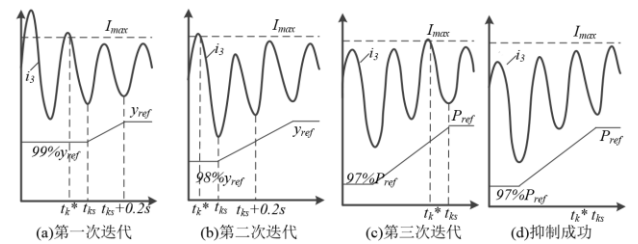


图 7 冲击电流抑制过程

Fig.7 A simple example of the limit strategy.

阈值电流的设定需要考虑合环电流与最大允许负荷电流,以及继电保护电流整定值的关系。针对合环电流对传统配电网中电流保护的影响,文献[8]已经进行详细分析,并指出合环电流的衰减非周期分量一般不会对电流保护 II 段造成影响,只要合环后稳态电流



有效值不超过馈线的最大容许载流量，合环也不会对电流速断保护造成影响。

但考虑 DG 并网后，实际工程中母线出口一般配有纵联差动保护作为主保护，当线路发生故障时，使两侧开关同时快速跳闸。因此应考虑合环电流对纵联保护的影响，即纵差保护应确保正常运行时保护装置不动作跳闸，应躲过正常运行时的最大不平衡电流。但是由上述分析可知，在合环操作后，线路上电流存在冲击分量，可能使电流值短时增大，这会造成流入线路两端电流互感器的一次电流增大。由于线路两端电流互感器励磁特性不同，即铁磁饱和程度不同，造成两个二次电流有较大差别，即不平衡电流增加。另外，冲击分量含非周期分量，而电流互感器传变非周期分量时所需的励磁电流幅值远大于传变周期分量电流时所需的励磁电流幅值。因此可能会引起铁芯饱和，不平衡电流增加。因此，应考虑合环冲击电流对纵差保护的影响，并在此基础上设定阈值电流  $I_{\max}$ 。

#### 4 仿真分析

在上海松江区某配网区域进行仿真验证，仿真系统如图 8 所示。仿真分别采用 PQ 控制，VSG 控制以及下垂控制的逆变型 DG 进行仿真分析，控制参数如表 2 所示。

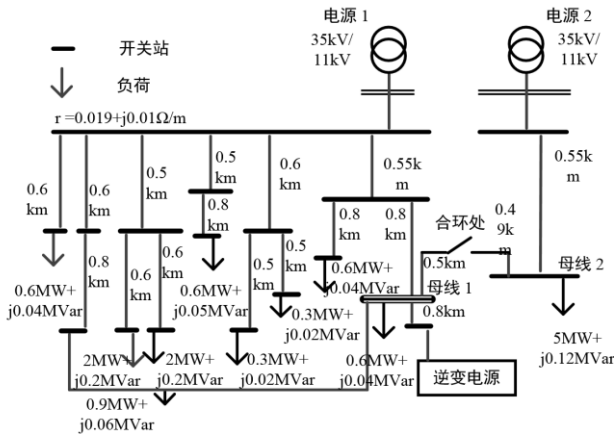


图 8 仿真模型

Fig.8 Systematic single line diagram of the simulation model.

表 2 控制参数

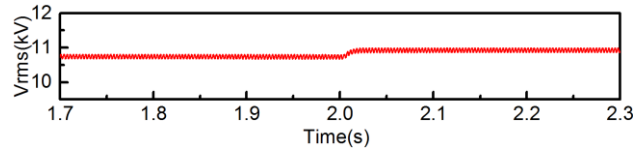
Tab.2 Control Parameters

控制策略	参数	值	参数	值
PQ 控制	$P_{ref}$	0.62MW	$Q_{ref}$	0.05MW
	$D_p$	0.11	$D_Q$	1.5
下垂控制	$\omega_{ref}$	100pi	$E_{ref}$	0.32kV
	$H$	0.1	$D$	0.01
VSG 控制				

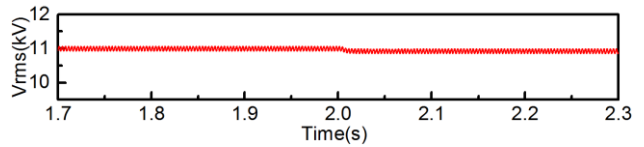
$D_Q$	0.1	$E_{set}$	0.32kV
-------	-----	-----------	--------

#### 4.1 VSG-IIDG

电源 1 与电源 2 相角差为  $5^\circ$ ，2s 时进行合环操作，阈值电流  $I_{\max} = 0.473kA$ 。图 9 为仿真结果，可以看到，合环后，母线 1 电压上升，母线 2 电压下降。



(a) 母线 1 电压



(b) 母线 2 电压

图 9 母线电压仿真结果

Fig.9 Simulation results of the bus voltage.

对仿真模型中逆变电源采用 VSG 控制方案，图 10 为采用抑制策略前 IIDG 输出电流仿真结果。可以看到，合环后 IIDG 稳态电流下降，但是在 2s 到 2.15s 间 IIDG 输出电流超过了阈值电流，因此需要采用抑制策略。图 11 为 IIDG 输出电流情况的变化情况，可以看到，2s 到 2.15s 间的涌流得到了抑制。

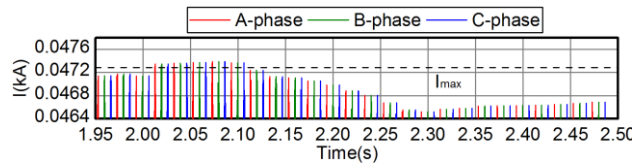


图 10 采用抑制策略前 VSG-IIDG 输出电流

Fig.10 The output current of the VSG-IIDG before limiting.

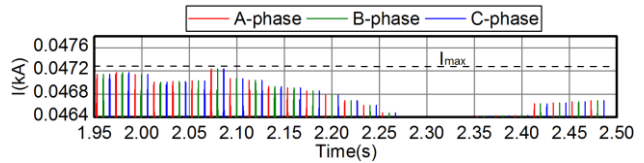
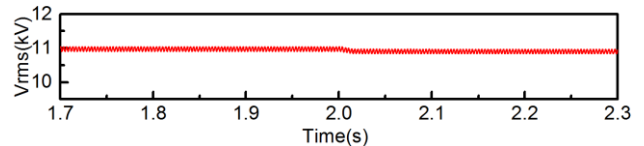


图 12 抑制策略后 VSG-IIDG 输出电流

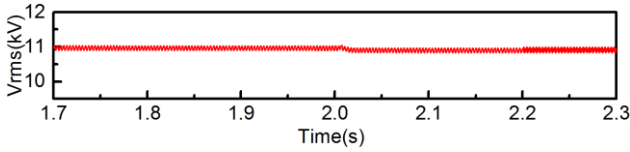
Fig.12 The output current of the VSG-IIDG after limiting.

#### 4.2 PQ-IIDG

电源 1 与电源 2 相角差为  $-10.5^\circ$ ，2s 时进行合环操作，阈值电流  $I_{\max} = 0.471kA$ 。图 13 为母线电压仿真结果。



(a) 母线 1 电压



(b) 母线 2 电压

图 13 母线电压仿真结果

Fig.13 Simulation results of the bus voltage.

图 14 为采用抑制策略前 PQ 控制的 IIDG 输出电流仿真结果。可以看到，合环后 IIDG 稳态电流非常接近阈值电流，表示控制参数  $\lambda < 0$  才能抑制冲击电流，因此不允许进行合环操作。

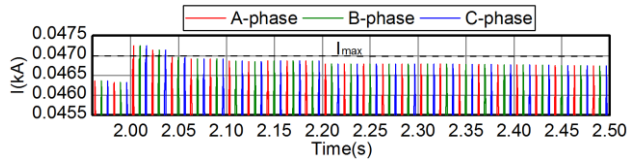
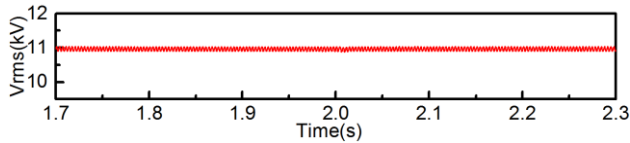


图 14 抑制策略前 PQ-IIDG 输出电流

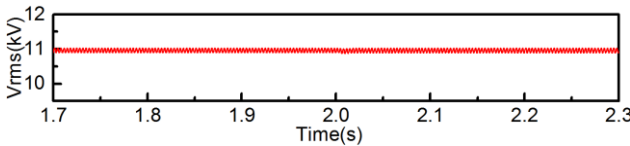
Fig.14 The output current of the PQ-IIDG before limiting.

#### 4.3 下垂控制 IIDG

电源 1 与电源 2 相角差为  $-3.5^\circ$ ，2s 时进行合环操作，阈值电流  $I_{\max} = 0.471 \text{ kA}$ 。图 15 为母线电压仿真结果。



(a) 母线 1 电压



(b) 母线 2 电压

图 15 母线电压仿真结果

Fig.15 Simulation results of the bus voltage.

图 16，图 17 分别为采用抑制策略前、后下垂控制的 IIDG 输出电流仿真结果。可以看到，2s 到 2.047s 间的冲击电流被完全抑制。

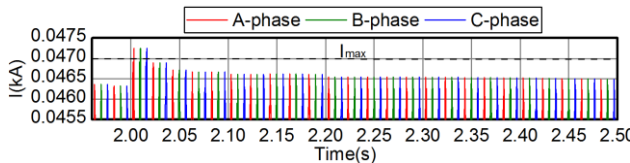


图 16 采用抑制策略前下垂控制 IIDG 输出电流

Fig.16 The output current of the droop-IIDG before limiting.

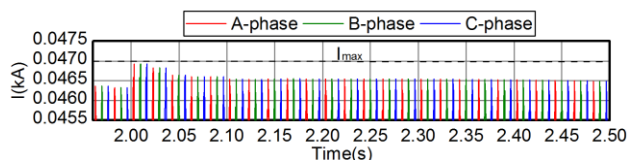


图 17 抑制策略后下垂控制 IIDG 输出电流

Fig.17 The output current of the droop-IIDG after limiting.

## 5 结论

本文考虑 DG 在不同控制策略下输出外特性，给出了 DG 在配电网合环操作时的冲击电流计算方法。对于电压源型 DG，合环瞬间 DG 输出电压不会突变；而电流源型 DG 输出电压由电路方程决定，输出电流由控制方程决定。随后，本文提出了一种适用于电压源型和电流源型 DG 的统一合环冲击电流抑制策略。调节过程自适应选取在冲击电流最小时进行，以减小控制参数变化对 DG 输出的影响。仿真结果表明，所提策略可以有效抑制合环操作的冲击影响。

## 参考文献

- [1] M. Li, W. Huang, and N. Tai. Transient Behavior Analysis of VSG-IIDG During Disturbances Considering the Current Limit Unit[C]. 2019 IEEE PES general meeting, Atlanta, USA, 2019.
- [2] T. Chen, W. Huang, J. Gu. Feasibility Study of Upgrading Primary Feeders From Radial and Open-Loop to Normally Closed-Loop Arrangement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19, 1308-1316.
- [3] M. Li, W. Huang, and N. Tai. A Dual-Adaptivity Inertia Control Strategy for Virtual Synchronous Generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019.
- [4] G. P. Harrison, A. R. Wallace. Optimal power flow evaluation of distribution network capacity for the connection of distributed generation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2005, 115 - 122.
- [5] B. Li, X. Yu, Z. Bo. Protection schemes for closed loop distribution network with distributed generator[C]. International Conference on Sustainable Power Generation & Supply 2009, 2009.
- [6] T. Chen, E. Lin, N. Yang. Multi-objective optimization for upgrading primary feeders with distributed generators from normally closed loop to mesh arrangement[J]. International Journal of Electrical Power & Energy, 2013, 413-419.
- [7] 帅智康, 邹福筱, 涂春鸣, 沈征. 微网暂态稳定性研

究[J].电力系统自动化,2015(16):151- 159.

Shuai Zhikang, Zou Fuxiao, Tu Chun Ming, Shen Zheng. Study on transient stability of microgrid [J]. Automation of electric power systems, 2015 (16): 151- 159.

- [8] 甘国晓,王主丁,李瑞.配电网合环冲击电流计算方法及其简化计算公式[J].电力系统自动化, 2014 (20), 115-120。

G. Gan, Z. Wang, R. Li.Methods and Simplified Formulas for Calculating Surge Currents from Loop Closing in Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 115-120.

- [9] 刘健,孙泉,张小庆.配电网合环分析与合环条件判断[J].2014,38(11), 1-6.

J. Liu, Q. Sun, X. Zhang. Analysis on and criteria for loop closing operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,1-6.

---

#### 作者简介

李美依 女, 1994 年生, 研究生, 研究方向为逆变电源稳定性分析及其控制。

E-mail: [limeiyi@sjtu.edu.cn](mailto:limeiyi@sjtu.edu.cn)

黄文焘 男, 1989 年生, 副教授, 研究方向为微网控制以及保护。

E-mail: [hwt8989@sjtu.edu.cn](mailto:hwt8989@sjtu.edu.cn)