

计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统 暂态稳定分析

田雨果, 王彤, 邢其鹏, 王增平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 为满足光伏发电系统随着装机容量的增加而提出的更高要求, 加入了虚拟惯量控制与低电压穿越使系统具备调频与调压的功能。针对计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统, 建立适用于暂态分析的锁相环扩展非线性模型。基于该模型使用等面积准则的方法分析系统在故障前、故障发生时以及故障切除后的暂态同步过程, 从而确定影响系统稳定性的因素。在此基础上, 继续使用等面积准则分析电压跌落深度、虚拟惯量控制器参数与锁相环比例、积分系数等因素对光伏暂态稳定性的影响。仿真证明, 所提方法可有效分析各种参数对光伏发电系统暂态稳定性的影响, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 光伏系统; 虚拟惯量控制; 低电压穿越; 锁相环; 暂态稳定性

Transient stability analysis of a photovoltaic generation system considering virtual inertia control and low voltage ride-through

TIAN Yuguo, WANG Tong, XING Qipeng, WANG Zengping

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To meet more requirements of a photovoltaic generation system with the increase of installed capacity, virtual inertia control and low voltage ride-through are added to enable the system to have frequency and voltage regulation. Given a photovoltaic generation system with virtual inertia control and low voltage ride-through, an extended nonlinear model of phase locked loop (PLL) is established for transient analysis. Based on the model, an equal area criterion is used to analyze the transient synchronization process of the system before a fault, when a fault occurs and after fault removal, so as to determine the factors affecting system stability. Then the equal area criterion is used to analyze the influence of voltage sag depth, virtual inertia controller parameters, phase locked loop proportional coefficient and integral coefficient on the transient stability of the photovoltaic system. Simulation results show that the proposed method can effectively analyze the influence of various parameters on the synchronization process of a photovoltaic power generation system, and verify the correctness of the theoretical analysis.

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

Key words: photovoltaic system; virtual inertia control; low voltage ride through; phase locked loop; transient stability

0 引言

随着光伏发电系统的日益发展, 电力电子变流器于电力系统中也扮演着越来越重要的角色^[1-2]。变流器作为光伏发电系统的重要元件之一, 通常具有

与常规同步发电机设备不同的性能, 例如其有着出色的变换速度和可控性, 但也存在非线性特性明显、故障穿越能力相对有限、缺少惯性和阻尼等不足, 这都给电力系统安全稳定运行带来了严峻的挑战^[3-4]。低惯量特性的光伏电源大规模地并入电网后, 要求电力系统需额外具备一定的惯性及阻尼特性以维持系统稳定运行^[5]。除此之外, 为了防止故障后光伏系统大规模脱网给电网带来严重危害, 在

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51637005); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助(LAPS20021)

光伏相关规定中,也明确要求大中型光伏电站需具备低电压穿越能力^[6]。因此,研究含虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统的动态特性,并根据动态特性对此系统进行暂态稳定分析具有重要意义。

近年来国内外学者针对光伏发电系统的暂态稳定分析进行了一定研究,文献[7-8]通过分析平衡点来判断故障后系统暂态稳定性;文献[9-11]发现除故障后平衡点的存在外,锁相环的初始状态与动态特性同样会影响并网系统的同步性;而为了分析锁相环的动态特性,文献[12-13]借鉴同步机的暂态稳定特性,推导出了适用于机理分析的并网系统非线性降阶模型,对电网短路故障下的稳定性问题进行了研究;文献[14-15]则利用锁相环的降阶非线性模型,分析了并网变流器在故障后失步的原因;文献[16]和文献[17]分别使用李雅普诺夫直接法与相图分析法评估并网系统暂态稳定性。基于上述文献研究可以发现,尽管已总结了光伏发电系统的动态同步过程,但是同时考虑虚拟惯量控制与低电压穿越要求对锁相环动态过程的影响,并对该系统进行暂态稳定分析的研究较少。

针对上述问题,本文针对计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统,从理论上研究了其与锁相环动态特性之间的相互作用,并根据该特性分析了系统故障后影响暂态稳定性的因素。文章首先建立含虚拟惯量控制与低电压穿越控制的光伏发电系统模型,考虑锁相环比例、积分系数以及虚拟惯量控制器参数对光伏系统的影响,建立了锁相环扩展非线性模型,并分析其动态特性;在此基础上使用等面积准则分析故障前、故障发生时以及故障切除后三种状态的动态同步过程,并进一步研究电路参数与控制器参数(包括故障电压降落,虚拟惯量控制器参数,锁相环比例、积分系数)对光伏系统暂态稳定性的影响;最后通过仿真验证以上理论分析的正确性。

1 系统模型

1.1 光伏发电系统拓扑结构

光伏发电系统拓扑结构如图1所示,主要包括光伏电池阵列、光伏逆变器及其控制系统等部分。图中, V_{pv} 与 I_{pv} 分别为光伏阵列输出的电压与电流; P_{mpp} 为经过最大功率点跟踪(MPPT)技术调整后输出的最大功率; i_p 为DC/DC变流器输出的直流电流; L_1 、 C_f 、 L_2 构成了LCL型滤波器; R_d 为滤波电容串联阻尼电阻; u_a 、 u_b 、 u_c 为并网点电压; C_{dc} 为直流母线电容; i_{dc} 为流经直流母线电容电流; U_{dc} 与 U_{dc0} 分别为直流母线电容电压与电压参考值; i_a 、 i_b 、 i_c

为并网点电流; L_g 与 R_g 共同组成电力系统等效阻抗; e_a 、 e_b 、 e_c 为电网电压; i_{dq} 为并网电流在 $d-q$ 坐标系下的 d 轴分量与 q 轴分量; i_{dq}^* 为有功和无功电流参考值。

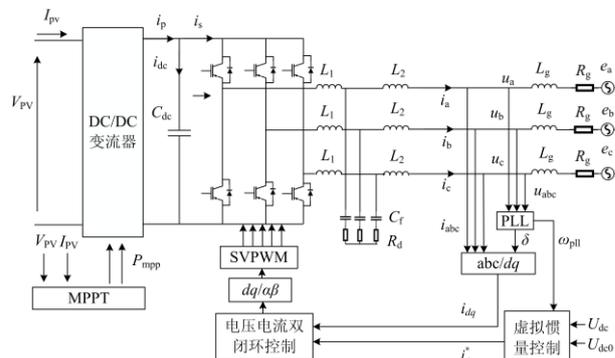


图1 光伏发电系统等值模型

Fig. 1 Equivalent model of photovoltaic generation system

系统正常运行时,逆变器使用空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)方式,而虚拟惯量控制环节与电压电流双闭环控制策略能够保证输出的电流和电压同频同相,满足并网要求^[18-19]。在一定的光照强度和环境温度下,光伏电池输出电流和输出电压之间是非线性的关系,而且存在唯一一点功率最大,即最大功率点。而最大功率点跟踪控制则是采用一定的控制策略寻求光伏电池的最佳工作状态,尽可能地保持光伏电池工作在最大功率点处以提高光伏系统的效率。两级式光伏发电系统最大功率点跟踪控制是作用在前级的Boost变换电路上,通过控制算法调节占空比来改变光伏电池的输出电压,从而实现光伏电池的最大功率跟踪。本文选择扰动法作为最大功率点跟踪算法,扰动法通过预设一个最大功率跟踪电路占空比值和一个占空比改变步长,检测当前光伏电池输出电压与输出电流,计算出当前电池功率,再与上一次存储的光伏电池输出电压和输出功率进行比较,舍小存大,根据步长值增大或减小占空比值,而后再检测、比较,如此反复迭代,可以使得光伏阵列动态工作在最大功率点处^[20]。

为便于实施光伏发电系统有功和无功的解耦控制,使用以并网点电压定位到 d 轴的 $d-q$ 坐标系进行电气量控制。 $d-q$ 旋转坐标系与 $x-y$ 同步坐标系之间的夹角用 δ 表示,可被写为

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_{pll} - \omega_0 \quad (1)$$

式中: ω_{pll} 表示锁相环角频率; ω_0 表示电网角频率。

考虑到实际中电网频率变化远远小于锁相环的动态变化,因此可以认为电网的频率保持不变,进

一步得

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{d(\omega_{pll} - \omega_0)}{dt} = k_p \frac{du_q}{dt} + k_i u_q \quad (2)$$

式中, k_p 、 k_i 分别表示锁相环的比例系数与积分系数。

在光伏发电系统中, 锁相环获取电网电压相位和逆变器输出电流相位后, 将两者之差反馈到 PI 控制器中来控制系统消除误差, 跟踪电网电压频率和相位^[21], 其结构框图如图 2 所示。

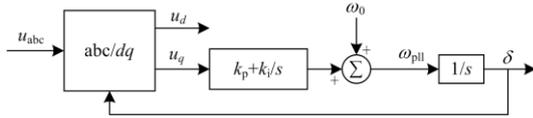


图 2 锁相环数学模型

Fig. 2 Mathematical model for PLL

1.2 低电压穿越模型

在光伏发电占比较低的电力系统中, 电网故障导致电压过低时, 光伏发电系统为保证其自身的安全会自动从电网中切除。而随着光伏电站装机容量的不断增大, 光伏电源脱网会导致大面积停电, 这给大规模应用光伏系统发电带来了极大的危险, 因此, 大容量光伏发电系统在电网电压过低时需要具备低电压穿越能力^[22]。

低电压穿越需符合图 3 所示的要求, 图中, U_{L0} 和 U_{L1} 分别表示低电压穿越电压上限值与电压下限值, U_{L0} 为额定电压的 90%, U_{L1} 为额定电压的 20%。电网电压跌落到 U_{L1} 后还需要继续保持并网运行 1 s, 并且要求光伏发电系统能够在 3 s 内调整其控制策略, 使逆变器向电网提供无功功率以保持光伏电源继续并网运行直至电压恢复正常。

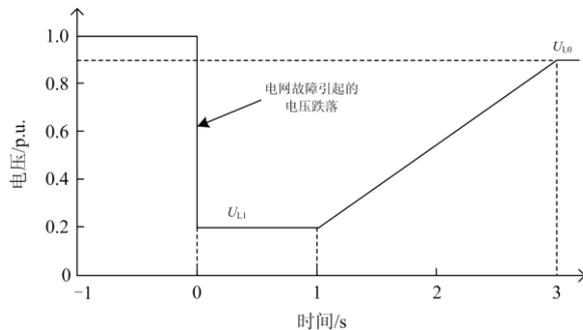


图 3 低电压穿越标准

Fig. 3 Low-voltage ride-through standards

1.3 虚拟惯量控制策略

在未额外配置储能的前提下, 为了使光伏发电系统具有响应负荷的能力, 使用直流母线电容在暂态过程中充放电的能力来为系统提供惯性和阻尼支撑, 虚拟惯量控制环节框图如图 4 所示^[23]。

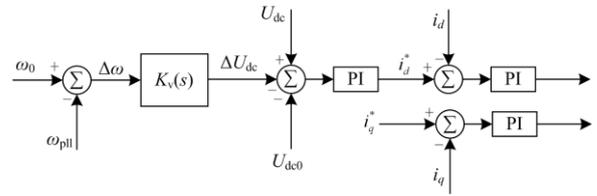


图 4 虚拟惯量控制环节框图

Fig. 4 Block diagram of virtual inertia control

外环中, 负荷变化导致的频率变化量 $\Delta\omega$ 经过虚拟惯量控制器 $K_v(s)$ 调节后得到直流母线电容电压变化量 ΔU_{dc} , 此变化量与直流母线电容电压参考值 U_{dc0} 共同作为给定值。将给定值与直流母线电容电压 U_{dc} 经过 PI 控制器输出, 得到内环的有功电流参考值 i_d^* 。考虑到直流电压和电流内环的动态速度远快于虚拟惯量控制外环, 因此有功电流参考值表达式可以简化为

$$i_d^* = k_{pu} [U_{dc} - U_{dc0} - k_{dp} (\omega_0 - \omega_{pll})] \quad (3)$$

式中: k_{pu} 为电压外环 PI 控制器系数; k_{dp} 为常规虚拟惯量控制中采用的虚拟惯量控制器参数。

2 光伏发电系统稳定性分析

2.1 锁相环扩展非线性模型

为了更详细分析影响光伏发电系统暂态稳定的因素, 需考虑阻抗的影响, 因此在原有锁相环基础之上将其修改为计及阻抗的扩展非线性模型。

根据 $d-q$ 坐标系与 $x-y$ 坐标系之间电气量的关系, 将电网电压由 $x-y$ 坐标系转换为 $d-q$ 坐标系, 可得

$$\begin{cases} e_d = E \cos \delta \\ e_q = -E \sin \delta \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 为电网电压幅值; e_d 和 e_q 分别为电网电压的 d 轴与 q 轴分量。

根据基尔霍夫定律与坐标变换公式可得出并网节点电压、并网点电流与电网电压在 $d-q$ 坐标系下的关系为

$$\begin{cases} u_d = e_d + R_g i_d - \omega_{pll} L_g i_q \\ u_q = e_q + R_g i_q + \omega_{pll} L_g i_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为逆变器输出电流的 d 轴与 q 轴分量。

根据式(4)与式(5)可推得锁相环的扩展非线性模型为

$$u_q = R_g i_q + \omega_{pll} L_g i_d - E \sin \delta \quad (6)$$

为了证明所提锁相环扩展非线性模型的正确性, 通过与原有锁相环模型进行时域仿真的对比,

其仿真结果如图 5 和图 6 所示。图 5 与图 6 分别代表电压降落至 0.3 p.u. 与 0.05 p.u. 时的不平衡量 u_q 与频率差 $\Delta\omega$ 。

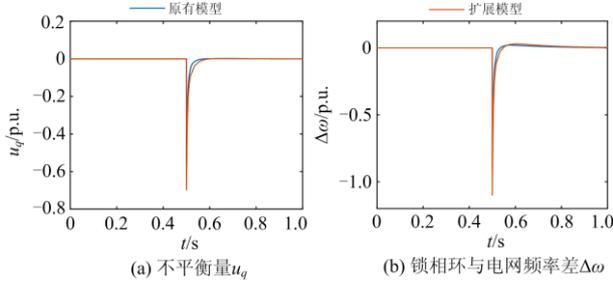


图 5 电压降落至 0.3 p.u.

Fig. 5 Voltage drops to 0.3 p.u.

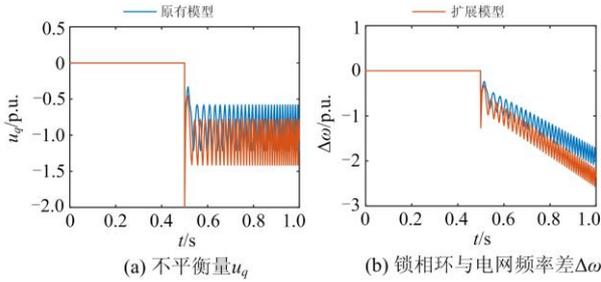


图 6 电压降落至 0.05 p.u.

Fig. 6 Voltage drops to 0.05 p.u.

根据图 5 与图 6 的仿真结果可以发现, 扩展模型与原有模型时域仿真差别主要在于等效阻抗对 u_q 和频率差的影响, 而在不同扰动情况下的时域动态特性保持一致, 表明了锁相环扩展非线性模型具有良好的可行性。

2.2 含低电压穿越与虚拟惯量控制的光伏系统模型

由于含变流器光伏电源可被看作受控电流源, 因此可以认为输出电流可由电流参考值直接指定。将式(3)中的有功电流参考值 i_d^* 代入锁相环扩展非线性模型中, 可将式(6)写为

$$u_q = R_g i_q^* + L_g \omega_{pll} i_d^* - E \sin \delta = R_g i_q^* + (a \omega_{pll} + b) \omega_{pll} - E \sin \delta = -E \sin \delta + c \quad (7)$$

式中: $a = L_g k_{pu} k_{dp}$; $b = L_g k_{pu} (U_{dc} - U_{dc0}) - L_g k_{pu} k_{dp} \omega_0$; $c = R_g i_q^* + (a \omega_{pll} + b) \omega_{pll}$ 。

而式(7)中的无功电流参考值 i_q^* 则根据低电压穿越要求而定, 如式(8)所示。

$$i_q^* = \begin{cases} k(1 - \frac{U}{U_N})I_N & (1 - \frac{1.1}{k})U_N \leq U \leq 0.9U_N \\ 1.1I_N & 0.2U_N \leq U \leq (1 - \frac{1.1}{k})U_N \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_N 为额定电压; U 与 U_N 的比值即代表电压跌落深度; I_N 为额定电流; k 为无功补偿斜率, 根据 LVRT 标准关于无功支撑的要求, k 应满足 $k \geq 2$ 。

2.3 光伏锁相环运动方程

类比于同步发电机的转子运动方程, 光伏发电系统中的锁相环运动方程同样可以根据其特性写为

$$J_{pll} \frac{d\omega_{pll}}{dt} = u_q - D_{pll} (\omega_{pll} - \omega_0) \quad (9)$$

式中: 锁相环的等效惯量与阻尼系数可分别近似为

$$J_{pll} \approx \frac{2}{3k_i}; \quad D_{pll} \approx \frac{2k_p E \cos \delta}{3k_i}。$$

将推导出的锁相环运动方程与传统同步发电机转子运动方程对比可以发现, 二者具有数学相似性, 式(9)中的 u_q 等价于转子运动方程中的功率不平衡量, 因此 u_q 可被看作影响频率变化的不平衡量。若阻尼系数 $D_{pll} > 0$, 当 $\omega_{pll} > \omega_0$ 时, 正的阻尼系数会使得锁相环频率产生负的变化率, 加速其恢复至电网频率, $\omega_{pll} < \omega_0$ 时的情况同理, 因此正阻尼系数对系统暂态稳定产生正向影响。因而对于光伏发电系统而言, 在使用等面积准则时, 需满足锁相环等效阻尼系数 $D_{pll} > 0$, 进而可得到约束条件为

$$\delta \in (\delta_{D1}, \delta_{D2}) = (-\pi/2 + 2n\pi, \pi/2 + 2n\pi) \quad (10)$$

2.4 发生故障时暂态同步过程分析

在发生故障前, 光伏发电系统处于稳定状态, 其 u_q - δ 关系如图 7 中曲线 A 所示。其中, 正弦曲线的幅值根据电压 E 的大小来确定, 落于 u_q 轴的 c 即为式(7)中的常数项 c , c_N 与 c_F 分别代表正常状态与故障状态下所对应的常数。短路故障后, 并网电压与频率会发生改变, 根据式(3)与式(8)可知, 有功和无功电流参考值 i_d^* 、 i_q^* 会随着频率与电压的变化而变化, 因此常数项 c 也会因发生故障而改变。使用图像表示, 即从图 7 中的稳定状态曲线 A 变为故障

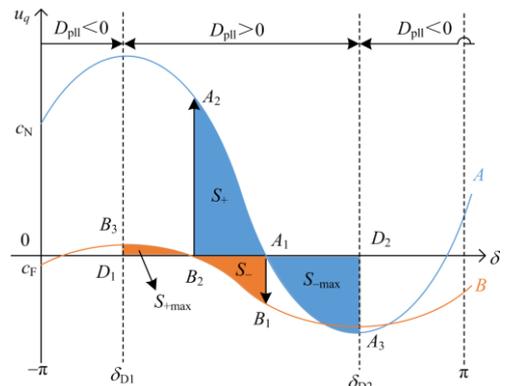


图 7 动态过程分析

Fig. 7 Illustration of the dynamic process

后的曲线 B ，相应的运行点也会从曲线 A 中的稳定平衡点 A_1 过渡到曲线 B 中的不稳定运行点 B_1 。由于虚拟惯量控制环节的调频作用，故障后骤变的频率会逐渐被调节至电网频率，此过程即为系统的再同步过程。在再同步的暂态过程中，锁相环的频率如果可恢复至电网频率，即可视作暂态稳定，若发生严重偏离，即为失步，而判断的标准则依据等面积准则与式(10)中所规定的阻尼系数符号。

根据上述分析可知，由于虚拟惯量控制环节的调频作用，电网与光伏电源之间的频差会在再同步过程中不断缩小，运行点也因此由不稳定的运行点 B_1 逐渐运行至稳定的平衡点 B_2 ，此过程形成的面积 $A_1B_1B_2$ 即为减速面积 S_- 。运行点到达 B_2 点后，会继续运行，使得频率差再次增加，直到 $\Delta\omega$ 在变化中恢复至 0。由于 δ 不允许超过临界状态 δ_{D1} 使阻尼系数变为负，因此最大的加速面积即为图中 $B_2B_3D_1$ 构成的 S_{+max} 。根据上述分析可知，保证暂态稳定的一个充分条件即为 $S_- \leq S_{+max}$ 。同理在故障切除后，由图中 $B_2A_2A_1$ 构成的加速面积 S_+ 同样要求不大于 $A_1A_3D_2$ 构成的最大减速面积 S_{-max} ，即故障切除后保证同步稳定性的一个充分条件为 $S_+ \leq S_{-max}$ 。

2.5 故障后动态同步过程分析

当电压降落过深导致骤降的频率过大时，根据式(7)中频率与常数项 c 的关系可以计算出此时 $u_q-\delta$ 曲线与横坐标无交点，根据 2.4 节的分析可知此时系统一定无法再同步。因此需要分析的是 $u_q-\delta$ 曲线与横坐标存在交点的情况，此情况下常数项 c 会随着 ω_{pll} 的增大而增大，体现在图中即为 $u_q-\delta$ 曲线会在频率恢复过程中不断向上平移，如图 8 中曲线 B 过渡到曲线 C 即为频率调节过程。当曲线向上平移时，减速面积 S_- 会随着曲线的上移而减小，最大加速面积 S_{+max} 会随着曲线的上移而增加。根据 2.4 节中的分析可知，保证故障后再同步的条件为 $S_- \leq S_{+max}$ ，因此表征故障后瞬时状态的曲线 B 即可视为故障后暂态过程中最不易再同步的时刻。若曲

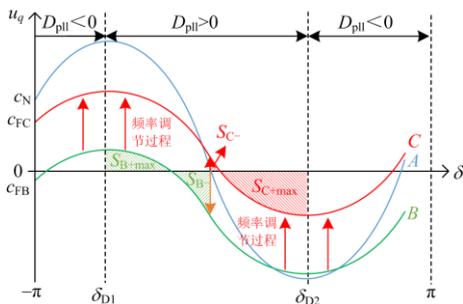


图 8 故障后动态同步过程分析

Fig. 8 Analysis of dynamic synchronization process after failure

线 B 所构成的减速面积 S_- 与最大加速面积 S_{+max} 满足 $S_- \leq S_{+max}$ ，则在其后的暂态过程中，光伏发电系统一定可以保持同步。若在故障后的瞬时状态下 $S_- > S_{+max}$ ，则并不代表系统一定无法再同步，需要进一步分析。在频率恢复过程中，若始终未满足 $S_- \leq S_{+max}$ ，则 ω_{pll} 会不断增大， $u_q-\delta$ 关系曲线会不断上移。如图 8 中所示，随着曲线 C 的上移，其减速面积 S_C- 会不断增大，最大加速面积 S_{C+max} 不断减小，致使再同步条件 $S_- \leq S_{+max}$ 在变化过程中始终无法达到，此时即为失步、暂态不稳定状态。

2.6 切除故障后动态同步过程分析

与故障后频率恢复过程分析类似，在切除故障后电压恢复正常时， $u_q-\delta$ 关系曲线会从图 9 中故障曲线 B 恢复至正常状态曲线 A ，此时同样存在频率调节过程。根据式(7)中频率与常数项 c 的关系可知，在频率恢复过程中，常数项 c 会随着 ω_{pll} 的减小而减小，体现在图中即为 $u_q-\delta$ 曲线会在频率恢复过程中不断向下平移，因此加速面积 S_+ 减小，最大减速面积 S_{-max} 增加。根据 2.4 节中的分析可知，故障切除后保证再同步的条件为 $S_+ \leq S_{-max}$ ，因此切除故障后瞬时曲线 A 即可视为暂态过程中最不易同步的状态。若曲线 A 所构成的暂态过程最大加速面积 S_+ 与最小减速面积 S_{-max} 满足 $S_+ \leq S_{-max}$ ，则在其后的暂态过程中，光伏发电系统一定可以保持同步。若上述情况不满足，即在切除故障后瞬时状态下 $S_+ > S_{-max}$ ，则并不代表系统一定不同步，需要进一步分析。在频率恢复过程中，若始终未满足 $S_+ \leq S_{-max}$ ，则 ω_{pll} 不断减小， $u_q-\delta$ 关系曲线会不断下移。如图 9 中所示，随着曲线 D 的下移，其加速面积 S_{D+} 会不断增大，最大减速面积 S_{D-max} 不断减小，致使稳定条件 $S_+ \leq S_{-max}$ 同样始终无法满足，此时亦为失步、暂态不稳定状态。

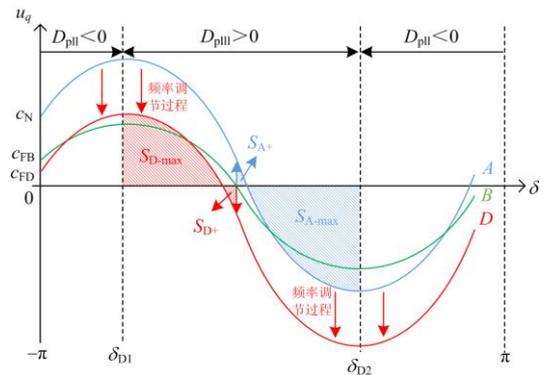


图 9 切除故障后动态同步过程分析

Fig. 9 Analysis of dynamic synchronization process after fault removal

在此等面积准则的分析基础上, 根据影响 u_q - δ 关系曲线的因素即可判断出影响光伏发电系统稳定性的因素。

2.7 影响系统稳定性因素分析

根据式(7)可知, 当光伏发电系统发生三相短路故障时, 如果电压降落过大, 会使得并网点电压 E 的数值较小。这样一方面可能会导致 $|c| > E$, 造成平衡点不再存在, 使得系统无法再同步; 另一方面若满足 $|c| \leq E$, 但由分析可知较小的电压 E 会减小加速面积, 增加减速面积, 增加失步的可能性。

如图 10 所示, 曲线 A 表示正常状态, 曲线 B 与曲线 C 均为故障后的状态, 其中曲线 B 电压降落深度小于曲线 C 。发生故障时, B 曲线形成的减速面积 S_{2-} 小于 C 曲线的减速面积 S_{3-} , 同时 B 曲线的最大加速面积 S_{2+max} 大于 C 曲线的最大加速面积 S_{3+max} , 因此根据 2.4 节中的分析可知电压降落小的 B 曲线更容易满足同步的充分条件 $S_- \leq S_{+max}$ 。在故障清除后, B 曲线的加速面积 S_{2+} 小于 C 曲线的加速面积 S_{3+} , 同时 B 曲线与 C 曲线的最大减速面积均为 S_{-max} , 同样由分析可知电压降落小的 B 曲线更容易满足稳定性充分条件 $S_+ \leq S_{-max}$ 。综上所述可知电压降落越小, 光伏系统故障后更容易保证同步。

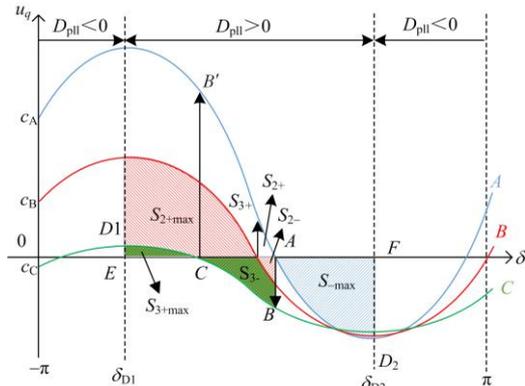


图 10 电压降落对光伏系统稳定性的影响

Fig. 10 Influence of voltage drop on the stability of photovoltaic system

同理根据式(7)可知, 随着虚拟惯量控制器参数 k_{dp} 的增大, 常数项 c 会随之减小。根据等面积准则分析, 常数项 c 的变化会导致加速面积与减速面积的变化, 故障后加速面积减速面积的分析方法同上述的电压降落。

3 仿真验证

以图 1 所示光伏发电系统作为仿真算例, 设置故障发生在 0.5 s 时, 验证上述有关电路参数和控制

器参数对光伏系统暂态稳定影响分析的正确性。

3.1 不同电压跌落深度对稳定性的影响

仿真电压降落分别为 35%、70% 和 85% 三种不同故障深度的情况, 其结果如图 11 所示, 其中图 11(a) 为不平衡量 u_q 的仿真结果, 图 11(b) 为频率差的仿真结果。可以发现, 电压降落为 35% 时, 故障后经过很短的时间 u_q 会再次为 0, 同时锁相环与电网的频率也会再次保持同步, 即系统故障后不会失步。而保持其他参数不变, 增加电压降落深度至 70% 以及 85% 后, 不平衡量 u_q 与频率差均无法再恢复至 0, 此时系统故障后失步。并且根据仿真图像可以发现, 系统的失步程度会随着电压降落深度的增加而愈发严重, 该仿真结果与 2.7 节中的分析结论一致。

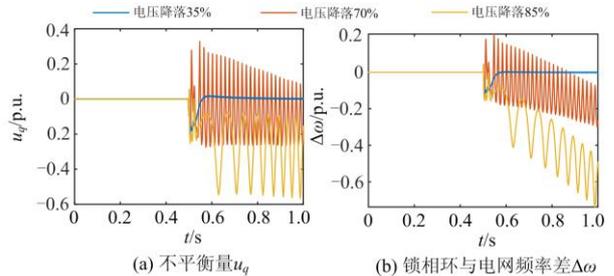


图 11 不同电压降落深度时的稳定性

Fig. 11 Stability under different depth of voltage drop

3.2 不同虚拟惯量参数对稳定性的影响

根据有功电流参考值 i_d^* 的表达式可知, 随着虚拟惯量控制器参数 k_{dp} 的增大, 常数项 c 会随之减小, 因此 k_{dp} 的增大会导致减速面积减小, 最大加速面积增大, 故障后系统更易保持同步稳定。保持电压降落恒为 35%, 同时使用相同的锁相环比例、积分系数, 分别设置虚拟惯量控制器参数为 $k_{dp}=0$ 、 $k_{dp}=100$ 以及 $k_{dp}=500$, 进行仿真实验, 仿真结果如图 12 所示。 $k_{dp}=0$ 时虚拟惯量控制参数最小, 如仿真结果所示, 不平衡量 u_q 与频率差均无法再恢复至 0, 系统此时失步。当虚拟惯量控制器参数不为 0

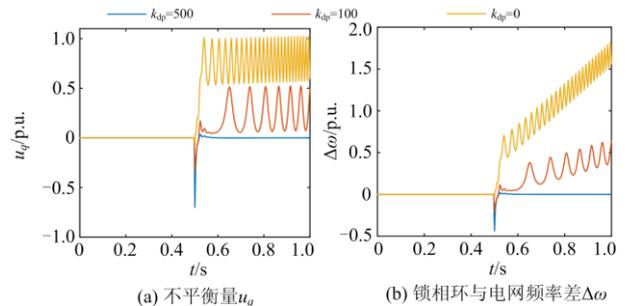


图 12 不同虚拟惯量参数时的稳定性

Fig. 12 Stability under different virtual inertia coefficients

时,可以发现,随着控制器参数 k_{dp} 的增大,系统故障后失步程度会逐渐减弱。当 $k_{dp}=500$ 时,不平衡量 u_q 会再次为 0,锁相环与电网之间的频率也可再次保持同步,系统故障后不发生失步。

3.3 不同锁相环参数对稳定性的影响

根据前述分析可知,系统的稳定性会随着锁相环等效阻尼系数 D_{pll} 的增大而增强,而 D_{pll} 则随着锁相环的比例系数 k_p 的增大而增大,随着积分系数 k_i 的增大而减小,因此较小的 k_p 与较大的 k_i 均会损害光伏系统的稳定性(J_{pll} 同理)。图 13 即为锁相环参数分别为 $k_p=200, k_i=1\ 000$; $k_p=100, k_i=1\ 000$ 以及 $k_p=200, k_i=4\ 000$ 的仿真结果。可以发现,当锁相环参数 $k_p=200, k_i=1\ 000$ 时,故障经过很短的时间 u_q 与 $\Delta\omega$ 会恢复至 0,系统不发生失步。然而保持参数 k_i 不变,减小比例系数 k_p 至 100,或保持比例系数 k_p 不变,增大积分系数 k_i 至 4 000 后,系统则发生失步,仿真结果与理论分析结论一致。

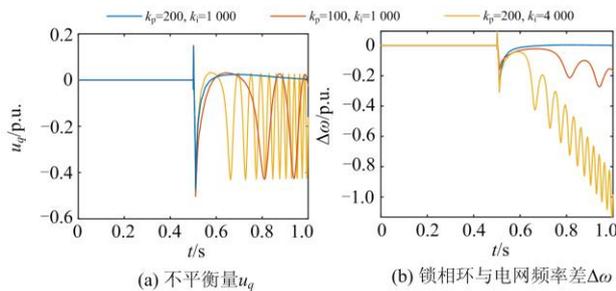


图 13 不同 PLL 参数时的稳定性

Fig. 13 Stability under different PLL coefficients

4 结论

本文针对计及虚拟惯量控制与低电压穿越控制的光伏发电系统,构建了用于暂态稳定性分析的锁相环扩展非线性模型,通过等面积准则分析故障前、故障发生时以及故障后的动态同步过程,并进一步研究了影响光伏发电系统暂态稳定性的因素,最终得出以下结论:

1) 在光伏发电系统中,故障后电压降落程度会影响系统再同步能力,即电压降落程度越大,系统越容易失步;

2) 根据理论分析和仿真结果发现,在保持其他参数不变的情况下,虚拟惯量控制器参数会影响系统故障后同步的能力,即在一定范围内增大虚拟惯量控制器参数,可提升光伏发电系统稳定性;

3) 锁相环比例、积分系数会影响锁相环等效惯量系数与等效阻尼系数,进而影响系统暂态稳定性,因此增大比例系数或减小积分系数均可提高系统稳定性,减小失步情况发生。

参考文献

- [1] SHANG Liqun, ZHU Weiwei, LI Pengwei, et al. Maximum power point tracking of PV system under partial shading conditions through flower pollination algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 400-406.
- [2] 奚鑫泽, 徐志, 高尚. 直流变压器光伏中压并网故障运行特性研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 89-95. XI Xinze, XU Zhi, GAO Shang. Fault operation of DC transformer for the PV medium voltage DC grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 89-95.
- [3] 于腾凯, 董靓媛, 杜晓东, 等. 考虑机会约束的配电网光伏并网容量分布鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 43-50. YU Teng kai, DONG Liangyuan, DU Xiaodong, et al. Distributionally robust optimization method of PV grid-connected capacity in a distribution network considering chance constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 43-50.
- [4] 杜健, 王德顺, 冯鑫振, 等. 考虑储能 SOC 的微网接口变流器 VSG 协同控制[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 128-135. DU Jian, WANG Deshun, FENG Xin zhen, et al. VSG cooperative control of microgrid interface converter considering energy storage SOC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 128-135.
- [5] 徐玉琴, 方楠. 基于稳压控制的独立光储微电网控制策略研究及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 67-74. XU Yuqin, FANG Nan. Control strategy research and simulation analysis of an independent optical storage microgrid based on voltage stabilizing control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 67-74.
- [6] 曹斌, 刘文焯, 原帅, 等. 基于低电压穿越试验的光伏发电系统建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 146-155. CAO Bin, LIU Wenzhuo, YUAN Shuai, et al. Modeling of photovoltaic power system based on low voltage ride-through test[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 146-155.
- [7] GOKSU O, TEODORESCU R, BAK C L, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683-1691.
- [8] DONG Dong, WEN Bo, BOROYEVICH D, et al. Analysis

- of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 310-321.
- [9] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [10] SHAKERIGHADI B, EBRAHIMAZADEH E, BLAABJERG F, et al. Large-signal stability modeling for the grid-connected VSC based on the Lyapunov method[J]. Energies, 2018, 11(10).
- [11] HE Xiuqiang, GENG Hua, YANG Geng. Synchronization stability analysis of grid-tied power converters under severe grid voltage sags[C] // 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), November 4-7, 2018, Shenzhen, China. IEEE, 2018.
- [12] 韩刚, 张琛, 蔡旭. 电网短路故障引发的全功率风电机组频率失稳机理与控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2167-2175.
- HAN Gang, ZHANG Chen, CAI Xu. Frequency instability mechanism and control method of full power wind turbine caused by grid short circuit fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2167-2175.
- [13] 张琛, 蔡旭, 李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4018-4026, 4280.
- ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Analysis of transient stability of full power conversion wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4018-4026, 4280.
- [14] HE Xiuqiang, GENG Hua. Transient stability analysis of grid-tied converters considering PLL's nonlinearity[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(1): 40-49.
- [15] HE Xiuqiang, GENG Hua, XI Jiangbei, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 438-450.
- [16] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2287-2295.
- [17] WU Heng, WANG Xiongfei. An adaptive phase-locked loop for the transient stability enhancement of grid-connected voltage source converters[C] // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 23-27, 2018, Portland, USA. IEEE, 2018.
- [18] 袁晓玲, 宋鹏飞, 范发靖, 等. 光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力电子技术, 2013, 47(3): 67-69.
- YUAN Xiaoling, SONG Pengfei, FAN Fajing, et al. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter[J]. Power Electronics, 2013, 47(3): 67-69.
- [19] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [20] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 91-94.
- LIU Bangyin, DUAN Shanxu, LIU Fei, et al. Maximum power point tracking of photovoltaic array based on improved disturbance observation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 91-94.
- [21] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-99, 121.
- GONG Jinxia, XIE Da, ZHANG Yanchi. The principle and performance of three-phase digital phase-locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 94-99, 121.
- [22] 光伏电站接入电网技术规范: Q/GDW 617—2011[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- Technical regulations for access of photovoltaic power stations to power systems: Q/GDW 617—2011[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2011.
- [23] 王素娥, 吴永斌, 熊连松, 等. 光伏并网发电系统的虚拟惯量控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3743-3751.
- WANG Su'e, WU Yongbin, XIONG Liansong, et al. Virtual inertia control strategy of photovoltaic grid connected power generation system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3743-3751.

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-06-23

作者简介:

田雨果(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏系统暂态稳定分析与控制; E-mail: ttyg117@163.com

王彤(1985—), 女, 通信作者, 博士后, 副教授, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制; E-mail: hdwangtong@126.com

邢其鹏(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态稳定分析与控制。E-mail: xqpncepu@163.com

(编辑 周金梅)