

基于全通滤波器的虚拟同步发电机低电压穿越控制策略

卢方舟,何安然,侯凯,王小红

(南京南瑞集团有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:传统的虚拟同步发电机(VSG)不具备低电压穿越能力,在电网电压跌落时难以保持其同步性,造成电流越限及设备脱网,为此提出一种基于全通滤波器(APF)的VSG低电压穿越控制方法。结合APF的工作原理提出在电网电压故障时如何获取准确的频率、相位信息。在此基础上设计了VSG低电压穿越的具体方法,利用阻尼转矩保证转子运动的稳定性,同时增加电网电压偏差反馈防止有功功率指令的突变及释放无功电流,使得VSG在电压跌落时保持了同步性且保证了输出电流的平稳过渡,实现了VSG在不同故障下的低电压穿越。

关键词:虚拟同步发电机;低电压穿越;全通滤波器;阻尼转矩;偏差反馈

中图分类号:TM 31;TN 713

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.026

0 引言

随着新能源大规模集群接入比例和远距离传输容量的增加,我国电网的调频调压能力不足和安全稳定问题日益突出;电网发电、输电、用电端电力电子化趋势日益明显,电网惯量和抗扰动能力不断下降^[1-3]。现有的新能源发电装置的控制机理和配置构成无法为电网提供惯量支撑,也不参与电网调频、调压,其大规模集中接入给大电网运行、调度和控制带来诸多挑战^[4-5]。目前采取的一些改善方法已深度挖掘了常规机组的调峰潜力,随着新能源占比进一步提升,电网调频、调压及稳定问题将更加严峻。

鉴于此,有学者提出大规模新能源并网应模拟传统同步发电机特性,使其主动适应电网。因此,在并网逆变器中引入同步发电机控制模型的虚拟同步发电机VSG(Virtual Synchronous Generator)技术应运而生^[6-8]。VSG由虚拟同步逆变器与惯性储能单元组成,模拟同步发电机一次调频和励磁控制机制,将新能源“负负荷”特性改造成同步发电机电源特性,主动适应系统的运行变化,实现自动有功调频、无功调压和阻尼系统振荡。文献[9-10]阐述了VSG的控制原理及数学模型,提出了基于阻尼特性的功率控制技术;文献[11-12]着重讨论了VSG在微电网中的应用及并离网无缝切换技术;文献[13]进一步分析了影响VSG并联运行稳定性及动态响应速度的主要因素,提出采用虚拟惯量匹配方法保证各电源按比例分配负荷。

目前针对VSG在电网正常情况下的运行特性已经有了较为深入的研究,但在实际应用中,配电网易受短路故障影响或因负载的突然下降导致电网电压的骤降或骤升。VSG作为一种新型电源,不但要具备传统机组的外特性,还应具备新能源机组的故障穿越能力,而目前对此鲜有研究^[14]。文献[15]提

出了在故障期间平滑切换至传统低电压穿越LVRT(Low-Voltage Ride-Through)控制的VSG低电压穿越控制方案,但未能解决VSG在工作模式下进行故障穿越的问题。传统的并网逆变器在进行低电压穿越时一般对有功电流进行限幅,同时按跌落深度给电网提供无功支持^[16-17];文献[18-19]还给出了基于正负序电流分解消除负序电流,抑制有功功率2倍频分量的低电压穿越方案。但是VSG利用转子运动方程进行虚拟惯量的控制,其原理与并网逆变器有很大差别,难以直接移植现有的低电压穿越技术;同时,电网电压发生不平衡跌落时,采用传统的d-q锁相技术无法获得准确的电网频率、相位,因而无法获得良好的并网控制性能。

综上所述,本文提出一种基于全通滤波器APF(All-Pass Filter)的储能VSG低电压穿越控制方案。首先利用APF保证精确锁定电网发生故障时的频率、相位信息,然后在此基础上阐述了储能VSG的低电压穿越控制方法,包括增加阻尼转矩和电压偏差反馈控制,最后基于RTDS搭建仿真模型,验证了所提方案的可行性。

1 基于APF的锁相方案

1.1 APF

APF又称为线性相移滤波器,其定义为:若m阶滤波器的幅频特性对所有频率均等于1,如式(1)所示,则该滤波器为m阶APF。

$$|A_m(e^{j\Omega})| = 1 \quad 0 < \Omega < 2\pi \quad (1)$$

以一阶APF为例,其幅值响应和相位响应为:

$$\begin{cases} |A_1(e^{j\Omega})| = \left| \frac{e^{-j\Omega} \frac{1-re^{-j\theta} e^{j\Omega}}{1-re^{j\theta} e^{-j\Omega}} \right| = 1 \\ \phi(\Omega) = -\Omega - 2 \arctan \frac{r \sin(\Omega-\theta)}{1-r \cos(\Omega-\theta)} \end{cases} \quad (2)$$

可以看出,一阶APF具有平坦的幅频特性,即

APF 并不会衰减任何频率的信号,但其相频特性基本呈线性递减状态,所以它会改变输入信号的相位。利用上述特性,APF 可对故障时刻电网的锁相角度进行预设,以消除电网电压跌落带来的相位偏差。

一阶 APF 的传递函数为:

$$G(s) = (\omega_0 - s) / (\omega_0 + s) \quad (3)$$

其中, ω_0 为基波角频率。一阶 APF 波特图见图 1。

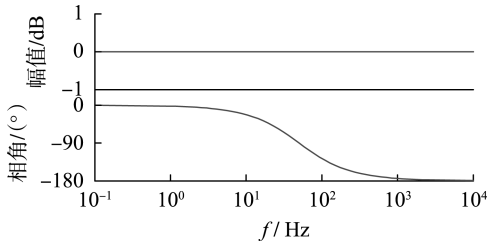


图 1 一阶 APF 波特图

Fig.1 Bode diagram of first-order APF

通过一阶 APF 后,信号的相移为:

$$\varphi(\omega) = -2 \arctan(\omega / \omega_0) \quad (4)$$

可以看出,相移在直流情况下为 0° ,在 $\omega = \omega_0$ 处为 -90° ;随着频率的增加,相移趋近于 -180° 。所以一阶 APF 可以对输入频率为 ω_0 的基波信号实现移相 90° 的功能。

1.2 电网电压相序分离

当电网电压不平衡时,电压矢量除了含有正序分量之外,还存在负序分量和零序分量,因而没有稳定的幅值和频率,无法正常使用锁相环,此时一般的处理方法是检测正序基频分量的频率、相位信息用于并网控制。为便于分析,令不平衡电压为:

$$\begin{cases} u_a(t) = u_p \cos(\omega t + \varphi_p) + u_n \cos(\omega t + \varphi_n) \\ u_b(t) = u_p \cos(\omega t + \varphi_p - 2\pi/3) + u_n \cos(\omega t + \varphi_n + 2\pi/3) \\ u_c(t) = u_p \cos(\omega t + \varphi_p + 2\pi/3) + u_n \cos(\omega t + \varphi_n - 2\pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

其中, u_p 、 u_n 分别为正序电压和负序电压的幅值; φ_p 、 φ_n 分别为正序分量和负序分量的初始相位。

不考虑零序分量,根据相序分离坐标系的不同,还存在静止 $\alpha\beta$ 坐标系和旋转 dq 坐标系,其表达式分别如式(6)、(7)所示,矢量图见附录中图 A1。

$$\mathbf{U}_{\alpha\beta} = \mathbf{U}_p e^{j\omega t} + \mathbf{U}_n e^{-j(\omega t - \varphi_n)} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{dq}^p = \mathbf{U}_p + \mathbf{U}_n e^{-j(2\omega t - \varphi_n)} \\ \mathbf{U}_{dq}^n = \mathbf{U}_n + \mathbf{U}_p e^{-j2\omega t} \end{cases} \quad (7)$$

1.3 $\alpha\beta$ 坐标系下基于 APF 的锁相环

$\alpha\beta$ 坐标系下基于 APF 的锁相方法动态性能好,实现较为简单。其基本思想是在 $\alpha\beta$ 坐标系下运用 APF 移相 90° 的功能进行初始相序的分离,然后将在 $\alpha\beta$ 坐标系下分离出的正序分量经 Park 变换到 dq 坐标系下得到 u_q 的正序分量进行锁相。

当电压不平衡时, $\alpha\beta$ 坐标系下的电网电压可表示为:

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = u_p \cos(\omega t + \varphi_p) + u_n \cos(-\omega t + \varphi_n) \\ u_\beta(t) = u_p \sin(\omega t + \varphi_p) + u_n \sin(-\omega t + \varphi_n) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $u_\alpha(t)$ 、 $u_\beta(t)$ 为 t 时刻电网电压在 $\alpha\beta$ 坐标系下的幅值。

在时域中移相 90° ,即在 $1/4$ 个周期之前, $\alpha\beta$ 坐标系下电网电压表达式如式(9)所示,可看出电压正序分量延迟了 $\pi/2$,负序分量超前了 $\pi/2$ 。

$$\begin{cases} u_\alpha\left(t - \frac{T}{4}\right) = u_p \cos\left(\omega t + \varphi_p - \frac{\pi}{2}\right) + u_n \cos\left(-\omega t + \varphi_n + \frac{\pi}{2}\right) \\ u_\beta\left(t - \frac{T}{4}\right) = u_p \sin\left(\omega t + \varphi_p - \frac{\pi}{2}\right) + u_n \sin\left(-\omega t + \varphi_n + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)化简为式(10),即:

$$\begin{cases} u_\alpha\left(t - \frac{T}{4}\right) = u_p \sin(\omega t + \varphi_p) - u_n \sin(-\omega t + \varphi_n) \\ u_\beta\left(t - \frac{T}{4}\right) = -u_p \cos(\omega t + \varphi_p) + u_n \cos(-\omega t + \varphi_n) \end{cases} \quad (10)$$

由式(8)和(10)可得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的正序分量为:

$$\begin{cases} u_\alpha^p = \frac{1}{2} \left[u_\alpha(t) - u_\beta\left(t - \frac{T}{4}\right) \right] \\ u_\beta^p = \frac{1}{2} \left[u_\alpha\left(t - \frac{T}{4}\right) + u_\beta(t) \right] \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,如果知道在某时刻之前 $1/4$ 个电网周期的电网电压状态,就可以得到电网电压正、负序分量在该时刻的计算结果。再将通过式(11)得到的 $\alpha\beta$ 坐标系下的正序分量变换到 dq 坐标系,然后对其进行锁相。 $\alpha\beta$ 坐标系下基于 APF 的锁相控制框图如图 2 所示。

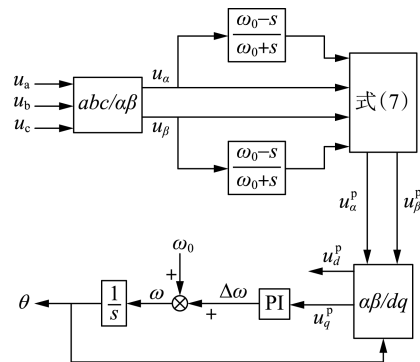


图 2 $\alpha\beta$ 坐标系下的控制框图

Fig.2 Control block diagram in $\alpha\beta$ coordinate system

2 VSG 低电压穿越策略

2.1 控制方案的基本思想

VSG 的控制原理如附录中图 A2 所示。图中,

P^* 、 Q^* 和 P 、 Q 分别为有功、无功功率的给定值和实际值; J 为虚拟转动惯量; D 为阻尼系数; 电阻 R_{ex} 、电抗 X_{ex} 表示励磁调节器的一阶延迟环节; U^* 为产生的电压参考指令。其中描述转子的运动方程如式 (12) 所示。

$$J(d\omega_R/dt) = T_p - T_e - D\omega_R, \quad d\theta_R/dt = \omega_R \quad (12)$$

其中, ω_R 、 T_p 、 T_e 、 θ_R 分别为转子角频率、机械转矩、电磁转矩和转子角度。

为实现上述运动方程, 控制中需引入 2 个积分环节, 但在单环控制中引入 2 个积分环节, 电网电压跌落时会造成控制系统的振荡。此时考虑引入 1 个阻尼转矩来稳定转子运动, 减缓转子角度变化。

在电网电压发生不平衡跌落时, VSG 作为发电机模型会失去同步性; 由于惯性, VSG 在短时间内无法对输出电压进行调整, 造成 VSG 输出电压与电网电压差异突然增大, 导致输出电流瞬间增大。针对该问题, 首先应对电流进行限幅, 保证 VSG 装置的安全不脱网运行; 同时增加新的控制环节来进一步降低 VSG 对电网电压跌落的敏感程度, 防止 VSG 与电网交互有功功率的突变, 在此基础上根据跌落深度发出无功来支撑电网电压。

由于故障期间无法获得准确的频率、相位信息, 需采用第 1 节所提的方法获取电网角度, 不再赘述。

2.2 方案实施

VSG 示意图如图 3 所示。图中, U_V 、 I_V 分别为输出电压、电流 (矢量 U_V 的方向平行于 d 轴); $R + j\omega L$ 为同步电抗; U_g 为电网电压。

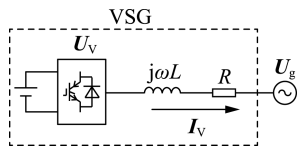


图 3 VSG 示意图

Fig.3 Schematic diagram of VSG

假设 VSG 的损耗可忽略不计, 原动机输入功率等于 VSG 输出功率, 此时 VSG 的转矩 T_e 为:

$$T_e = U_V i_d / \omega \quad (13)$$

当电网电压跌落时, 转矩 T_e 会随之出现较大波动, 为稳定转子的运动过程, 引入 VSG 转矩的准微分环节作为阻尼转矩。由于微分控制对突变信号的响应非常强烈, 在反馈通道中使用微分环节时, 参考输入并没有参与微分过程, 因此当参考输入发生突变时, 可以得到更为平稳的控制输出。实际应用中的微分环节为惯性环节和微分环节的串联, 其传递函数可表示为:

$$G(s) = K\tau s / (\tau s + 1) \quad (14)$$

其中, K 和 τ 分别为微分环节的比例常数和惯性环节的时间常数。则模拟实际发电机中阻尼绕组提供

的阻尼转矩 T_{ed} 如式 (15) 所示。

$$T_{ed} = K_d t_d T_e s / (1 + t_d s) \quad (15)$$

其中, K_d 为准微分环节的增益; t_d 为准微分环节的时间常数。

引入该环节后, 当有功给定发生突变时, 周期性振荡的有功功率会被该阻尼抑制并在经历数个振荡周期后消失, 迅速达到新的有功给定值。

进一步分析发现, 转子角度 θ_R 和电网角度的相位差 δ 造成了电网电压与 VSG 输出电压的偏差为:

$$U_{gd}^p = U_g^p \cos \delta, \quad U_{gp}^p = U_g^p \sin \delta \quad (16)$$

当电网发生故障时, 该偏差迅速增大。为降低电压严重跌落带来的影响, 需对式 (16) 中的电网电压分量进行处理。引入 1 个可变增益 K_r , 其表达式及变化趋势如式 (17) 所示, 其中 u_g^p 为标幺值。

$$K_r = \max(u_g^p, 0.85) / \min(u_g^p, 0.85) \quad (17)$$

一方面, 将上述修正过的电压偏差作为前馈引入平衡电流控制中作为补偿, 可使控制系统迅速对电网电压的跌落情况做出反应; 另一方面, APF 的移相作用可有效降低数字控制系统的延时, 提高系统的抗电压扰动动态性能。通过增加该可变增益, 电网电压发生跌落甚至严重跌落时, VSG 只认为电网电压发生了很小的波动, 避免出现有功功率的突变, 稳定了输出电流; 同时它可以根据跌落深度释放 VSG 的无功电流, 起到支撑电网电压的作用。

综上所述, VSG 在电网电压发生不平衡跌落时的控制原理图如图 4 所示。其包括 VSG 平衡电流控制、转子运动控制、机端电压控制及上述反馈控制。控制方案中选取 D_p 和 D_q 分别作为有功-频率和无功-电压下垂系数, 用于模拟实际同步发电机外特性, 控制 VSG 的频率、电压和有功/无功功率。在 VSG 平衡电流控制方面, 本文只考虑了正序电流的平衡电流控制, 通过 d 、 q 轴的正序电压分量计算得到正序电流参考值, 以此来抑制负序电流。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

在 RTDS 仿真平台上对上述控制方案进行仿真, 仿真模型的示意图如图 3 所示, 主要仿真参数如下: 额定功率为 1 250 kW, 交流电压为 627 V, 滤波电感为 120 μ H, 直流电压为 1 100 V, 有功下垂系数 $D_p = 4.9 \times 10^{-6}$, 无功下垂系数 $D_q = 6.3 \times 10^{-5}$, 增益 $K_d = 8$ 。

根据相关并网检测标准, 本文选取 3 种故障情况进行仿真, 分别为单相接地短路故障、两相接地短路故障和两相相间短路故障。故障时间持续 0.5 s, 1 s 前电网为额定电压, VSG 以额定功率运行; 1~1.5 s 电网发生不对称跌落, VSG 进行低电压穿越; 1.5 s 后恢复正常。故障前后装置均按额定功率运行。

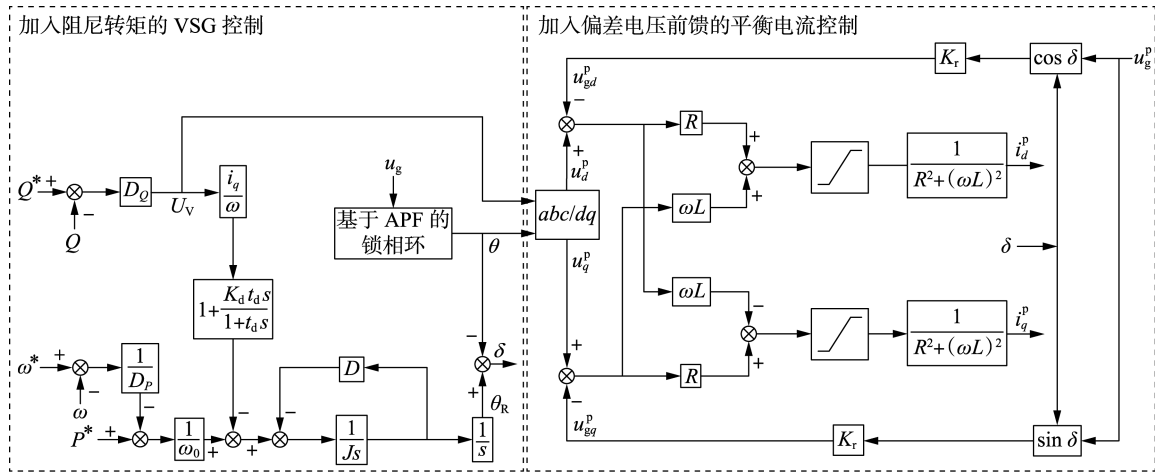


图 4 VSG 低电压穿越控制原理图

Fig.4 Control principle diagram of VSG LVRT

3.2 仿真结果

图 5 为电压跌落期间,锁相环输出的频率波形。由图 5 可知,未加入 APF 时,频率在故障期间振荡失稳,将反复触发 VSG 功能,导致装置有功功率指令发生振荡,同时该情况下的锁相角度也无法用于其他的控制;加入 APF 后,锁相环输出频率稳定在 50 Hz 附近,未出现较大变化和频繁波动。

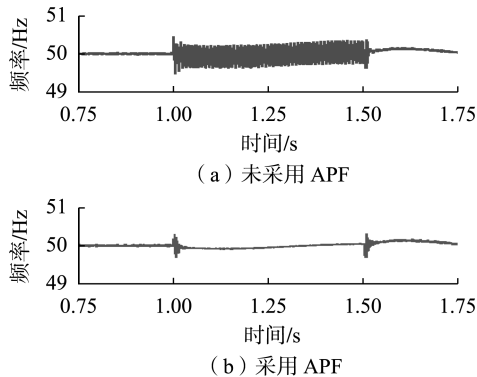


图 5 仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms

图 6 给出了电网发生单相接地短路故障时, VSG 未采用低电压穿越控制时的仿真波形。从图中可以看出,电网发生不对称跌落故障时, VSG 输出电流峰值达到近 4 000 A,且严重不平衡,该电流将严重危及 VSG 设备的安全并导致保护脱网;由于转子角度的变化导致转子的转矩和有功功率减小,但由于惯性的存在,有功功率及无功功率波形呈现出振荡的状态。

图 7 为采用低电压穿越控制策略后, VSG 在电网发生单相接地短路故障时的仿真波形。可见当加入了新的控制模块后,系统有功指令迅速下降, VSG 在故障期间输出电流迅速下降但未出现明显畸变,输出有功功率降至接近于 0 且保持稳定,同时控制系统根据单相跌落的故障深度提供了 400 kvar 的无

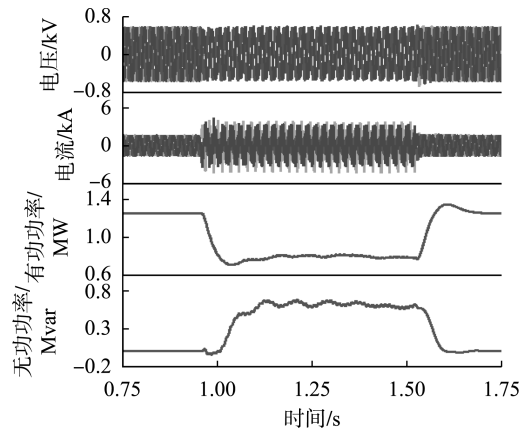


图 6 不采用低电压穿越控制时的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms without LVRT control

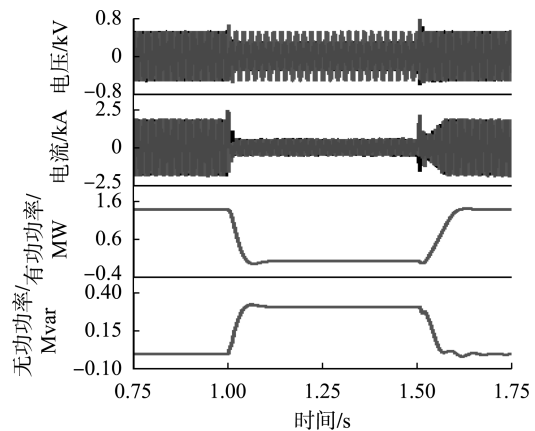


图 7 采用低电压穿越控制后,发生单相接地短路故障时的仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms under single-phase grounding short circuit fault, with LVRT control

功功率支撑。需要说明的是,此处的 400 kvar 无功功率为根据跌落电压和输出电流的计算结果,并不表示正常电压下输出 400 kvar 无功功率需要的无功电流,当电压跌落时,系统发出的实际无功电流已达到 600 A。切除故障时,由于有功功率的迅速增大,

造成了短时的电流波动,这是由于转子转矩的变化未跟上转子角度的变化,但在控制中特别地对过渡过程进行了处理,故该波动电流的幅值和持续时间不会对并网 VSG 的稳定性和设备安全造成影响。

图 8 给出了采用低电压穿越控制后,电网发生两相接地故障时的仿真波形。可见该故障发生时电压跌落进一步加深,VSG 需输出更大的无功电流以支撑系统电压;VSG 输出有功功率降至接近于 0 且保持稳定,控制系统提供了约 400 kvar 的无功支撑,同样地,此时系统输出的实际无功电流已达到 900 A。

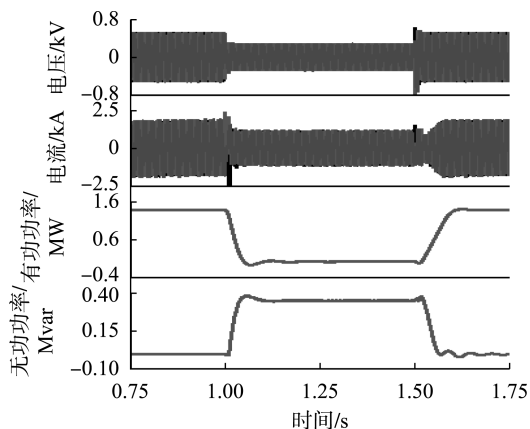


图 8 采用低电压穿越控制后,发生两相接地短路故障时的仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms under two-phase grounding short circuit fault, with LVRT control

图 9 给出了采用低电压穿越控制后,电网发生两相相间短路故障时的仿真波形。可以看出,系统根据跌落深度输出约 750 A 的无功电流,有功和无功迅速改变并保持稳定,切换时刻电流未见明显的越限冲击。

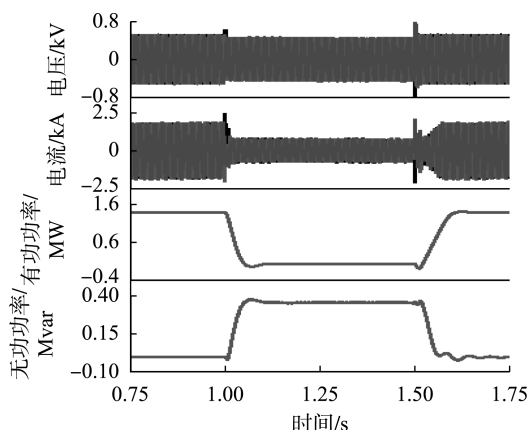


图 9 采用低电压穿越控制后,发生两相相间短路故障时的仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms under two-phase short circuit fault, with LVRT control

上述仿真结果表明,本文所提的 VSG 低电压穿越控制策略在不同电网电压跌落故障下,均具备良好的低电压穿越性能。需要指出的是,由于故障前

后设备均按额定功率运行造成切换过程存在一定的冲击,如果在穿越前后设备运行在小功率工况下,冲击也会随之减小。

4 结论

本文提出了一种基于 APF 的 VSG 低电压穿越技术,在精确获得电网电压故障期间频率、相位信息的基础上,通过引入同步转矩的准微分环节作为阻尼转矩反馈至同步转矩控制,增强了故障期间转子运动的同步性,同时增加电网电压偏差反馈来提升 VSG 低电压穿越性能。仿真结果表明所提控制方案能很好地抑制有功指令突变造成的振荡和冲击电流,保证了故障期间 VSG 的同步性和稳定性,为电网电压发生不平衡时 VSG 的低电压穿越提供一种解决思路。

需要说明的是,目前针对 VSG 在电网电压故障时运行情况的研究尚在起步阶段,特别是在故障发生和故障消除时刻电网状态的快速准确判别、VSG 的平滑过渡及冲击抑制、故障穿越过程中功率振荡等问题还有待进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杜威,姜齐荣,陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):26-31,36.
DU Wei,JIANG Qirong,CHEN Jiaorui. Frequency control strategy of generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(23):26-31,36.
- [2] 王逸超,谢欣涛,陈仲伟,等. 不同容量微网逆变器的自适应虚拟阻抗运行策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):29-33.
WANG Yichao,XIE Xintao,CHEN Zhongwei,et al. Adaptive virtual impedance operation strategy of microgrid inverters with different capacities[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):29-33.
- [3] LI Y W,VILATHGAMUWA D M,LOH P C. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(5):1195-1203.
- [4] ENSLIN J H R,HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(6):1586-1593.
- [5] BORGES C L T,MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. Electrical Power and Energy Systems,2012,36:107-116.
- [6] 张兴,朱德斌,徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报,2012(3):1-6,12.
ZHANG Xing,ZHU Debin,XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply,2012(3):1-6,12.
- [7] CHEN Y,HESE R,TURSCHNER D,et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]//2011 International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives. Malaga,Spain:IEEE,2011:1-6.

- [8] VU V T, VISSCHER K, DIAZ J, et al. Virtual synchronous generator: an element of future grids [C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2010: 1-7.
- [9] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [10] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 72-77.
LI Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77.
- [11] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16-23.
- [12] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 444-454.
WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-454.
- [13] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [14] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [15] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHANG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140.
- [16] 廖勇, 庄凯, 姚骏. 电网电压不平衡时全功率风电并网逆变器的控制策略 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 72-78.
LIAO Yong, ZHUANG Kai, YAO Jun. A control strategy for grid-connecting full power converter of wind power generation system under unbalanced grid voltage [J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 72-78.
- [17] 郑飞, 张军军, 丁明昌. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 19-24.
ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Low voltage ride through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 1-6.
- [18] 周皓, 童朝南, 刘宝其, 等. 电网不平衡条件下的光伏并网发电控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 27-32.
ZHOU Hao, TONG Chaonan, LIU Baoqi, et al. A control strategy for grid-connected of photovoltaic system under unbalanced voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 27-32.
- [19] 王京保, 李辉, 张娟. 电网电压不平衡时光伏并网逆变器低电压穿越技术 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 111-116.
WANG Jingbao, LI Hui, ZHANG Juan. Research on low-voltage ride-through of grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced grid voltage conditions [J]. Proceedings of the CSU-ESPA, 2013, 28(11): 111-116.

作者简介:



卢方舟

卢方舟 (1990—), 男, 江苏盐城人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为新能源发电及储能控制技术 (E-mail: lufangzhou@sgepri.sgcc.com.cn);

何安然 (1985—), 男, 安徽亳州人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为新能源发电控制技术 (E-mail: heanran@sgepri.sgcc.com.cn);

侯凯 (1981—), 男, 江苏徐州人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为功率电子变换技术 (E-mail: houkai@sgepri.sgcc.com.cn)。

Low-voltage ride-through control strategy of virtual synchronous generator based on all-pass filter

LU Fangzhou, HE Anran, HOU Kai, WANG Xiaohong
(NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China)

Abstract: Traditional VSG (Virtual Synchronous Generator) may lose its synchronism under the voltage dip, resulting in the over-limit current and equipment outage. To solve these problems, a VSG LVRT (Low-Voltage Ride-Through) control method based on APF (All-Pass Filter) is proposed. How to obtain accurate frequency and phase information in the case of voltage fault is proposed according to the principle of APF. On this basis, a definite VSG LVRT control scheme is established. To ensure the synchronism of VSG and smooth the output current under the voltage dip, the proposed approach utilizes the damping torque to stabilize the rotor motion, and further introduces a voltage deviation feedback to prevent the active power command mutation and release the reactive current. Consequently, the VSG LVRT under different grid faults is realized.

Key words: virtual synchronous generator; low-voltage ride-through; all-pass filter; damping torque; deviation feedback

附录

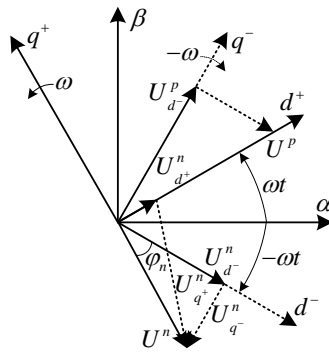


图 A1 电压正负序分离矢量图

Fig.A1 Positive and negative sequence voltage vector

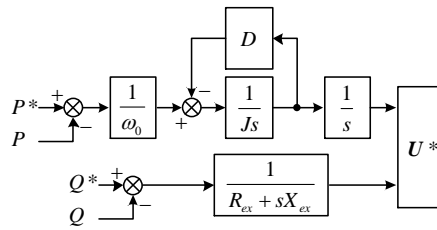


图 A2 VSG 控制原理

Fig.A2 VSG control principle