

# 基于串联制动电阻的生物质能同步发电机组 低电压穿越研究

李生虎, 安锐, 孙琪

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 对用于生物质能发电(BPP)的并网同步机组(SG),其低电压穿越(LVRT)不便沿用大型 SG 紧急控制措施。采用串联制动电阻(SBR)实现 BPP 中 SG 的 LVRT,采用计及励磁系统动态控制的等面积定则,提出了 SBR 阻值解析算法。基于 SG 及励磁系统,量化 SBR 功率,将其引入 SG 加速面积中,建立了 SG 加速和减速面积表达式。结合机械功率和切入功角,利用等面积定则,推导出满足 LVRT 准则 SBR 最小阻值的解析算法。改变系统参数,分析其对 SBR 最小阻值的影响,以选择新安装 BPP 电厂参数。动态仿真结果验证了基于解析算法选取 SBR 阻值的正确性。可以发现 SG 惯性或励磁电压上限越大, $q$  轴同步电抗、 $d$  轴暂态电抗或变压器电抗越小,机械功率或切入功角越小,所需的 SBR 阻值越小。对 SBR 阻值影响从大到小依次排序为  $d$  轴暂态电抗、惯性时间常数、 $q$  轴同步电抗、变压器电抗、励磁电压上限值。

**关键词:** 低电压穿越; 同步发电机组; 生物质能发电厂; 串联制动电阻; 等面积定则

中图分类号: TM 341

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.001

## 0 引言

生物质能发电利用农业、林业和工业废物、垃圾为原料,与风能、太阳能同属可再生能源。与风电、光伏采用变流器并网不同,生物质能发电多采用同步发电机(SG)并网,随机性较弱,可控程度和电能质量稍好<sup>[1]</sup>。

新能源接入影响电网有功平衡和暂态稳定<sup>[2-3]</sup>,同时对其有低电压穿越(LVRT)要求。目前风电机组(WTG)的 LVRT 研究成果很多,如文献[4-6]研究了利用串联制动电阻(SBR)实现感应风电机组 LVRT,给出 SBR 投切判据,仿真选取 SBR 阻值;文献[7-9]采用转子或直流侧撬棒保证双馈感应风电机组或直驱永磁同步机组不脱网运行。

但是并网标准并不局限于风电和光伏,同样适用于 SG。德国在 2008 年提出中压并网导则<sup>[10-11]</sup>,其中直接并网 SG 被定义为第 1 类机组,同样要满足 LVRT 准则。SG 与电网间不存在缓冲电力电子设备,功角摇摆后果远比过电流严重,需优先考虑。但现有 SG 研究多忽略 LVRT,原因在于:大型水、火电厂中,SG 惯性较大<sup>[12]</sup>,即使第一摆失稳,时间也长达零点几到几秒,一般可以满足 LVRT 准则;大型电网紧急控制措施(ECMs)非常完备,如电气制动、快关(调)汽门、低频/低压减载等,可以最大限度维持 SG 不脱网。

生物质能发电厂(BPP)中 SG 容量和惯性较小,外部故障后容易失稳。出于成本考虑,其 ECMs 远没

有大型 SG 完备。其 LVRT 问题与风电机组不相同,即便是风电机组,不同类型的机组 LVRT 面临的问题也不同。鼠笼式感应发电机(IG)面临的是滑差失稳问题;双馈感应发电机(DFIG)面临的是转子变流器过电流和直流母线过电压问题;直驱永磁同步发电机组(PMSG)面临的是直流母线过电压问题;而 SG 面临的是功角失稳问题。不同类型的机组对应于不同的失稳方式,相关的约束条件不同,不能将 WTG 的 LVRT 措施直接移植到 SG,因此迫切需要研究 SG 的 LVRT 特性。然而目前国内外相关研究极少,只有文献[13]检验了 SG 是否满足 LVRT 准则,讨论了采用 SBR 实现 LVRT 的可行性,但未仿真验证,也未给出 SBR 取值算法。

针对 SG 功角稳定问题,Xyngi 研究了故障距离的影响<sup>[14]</sup>;Calderaro 分析了 SG 脱网后暂态过程对线路保护的影响<sup>[15]</sup>;Razzaghi 仿真了不同系统参数和故障形式对临界切除时间(CCT)的影响,用于脱网判据整定<sup>[16]</sup>;Kalyani 仿真了 SG 不同阶数模型的暂态稳定性<sup>[17]</sup>。上述文献均基于时域仿真算法。采用能量函数(EF)法,文献[18-20]建立 SG 二阶模型,Sun 利用哈密顿定则建立 SG 三阶模型<sup>[21]</sup>,用以分析暂态稳定性。上述文献只计算 CCT,确定脱网判据,未提出 LVRT 措施;而时域仿真和能量函数方法也未直接确定 LVRT 参数。另外,二阶模型得到的稳定结果误差较大;三阶模型计及励磁绕组动态,但未考虑励磁控制。

针对 BPP 中 SG 暂态稳定性,本文采用 SBR 实现 LVRT,首次提出计及励磁系统动态控制的等面积定则,推导 SBR 阻值解析算法。基于 SG 及励磁系统,量化 SBR 功率,将其引入 SG 加速面积,建立加速和

收稿日期:2015-10-27;修回日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277049)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277049)

减速面积表达式。结合机械功率、切入功角,利用等面积定则确定满足 LVRT 准则 SBR 最小阻值。改变系统参数,分析其对 SBR 最小阻值的影响,对新安装 BPP 参数选择有参考意义。动态仿真结果验证了解析算法选取 SBR 阻值的正确性及 LVRT 的有效性。

## 1 故障后励磁电压时域表达

SG 结构图如图 1 所示,其机端通过升压变压器 T 连接到公共连接点(PCC)。当 SG 正常运行时,开关闭合,旁路 SBR;当满足投入判据时,开关断开,串入 SBR 以提高机端电压,减小功角摇摆,使得 SG 满足 LVRT 准则,维持并网。

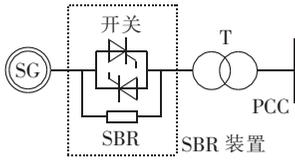


图 1 SBR 接入同步发电机

Fig.1 SG with SBR

SG 的三阶模型方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_r - 1 \\ T_J \dot{\omega}_r = P_m - P_e(\delta, E'_q, U_{PCC}) - D(\omega_r - 1) \\ T'_{d0} \dot{E}'_q = -E'_q X'_{d\Sigma} / X'_{d\Sigma} + (X_d - X'_d) U_{PCC} \cos \delta / X'_{d\Sigma} + E_f \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $X_{d\Sigma} = X_d + X_T$ ;  $X_{q\Sigma} = X_q + X_T$ ;  $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T$ ;  $\delta, \omega_r, T_J, P_m, P_e, D$  分别为功角、角速度、惯性时间常数、机械功率、电磁功率和阻尼系数;  $T'_{d0}, E'_q, U_{PCC}, X_d, X_q, X'_d, X_T, E_f$  分别为  $d$  轴暂态时间常数、 $q$  轴暂态电动势、PCC 电压、 $d$  轴同步电抗、 $q$  轴同步电抗、 $d$  轴暂态电抗、变电压电抗和励磁电压。  $P_e$  定义为:

$$P_e = \frac{E'_q U_{PCC}}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U_{PCC}^2 (X_{q\Sigma} - X'_{d\Sigma})}{2 X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin(2\delta) \quad (2)$$

基于 IEEE STA1 模型<sup>[22]</sup>,励磁模型见图 2。其中,  $T_B, T_C$  为滞后环节时间常数;  $T_A, K_A$  分别为放大环节时间常数和放大倍数;  $U_1$  为滞后环节后的输出值;  $E_{fp}$  为放大环节输出的励磁电压;  $E_{f0}$  为励磁电压初值;  $E_{fmax}, E_{fmin}$  分别为励磁电压上限值和下限值;  $U_{ref}$  为 PCC 电压参考值;  $s$  为拉氏算子。

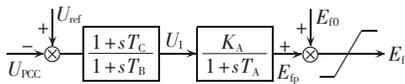


图 2 IEEE STA1 励磁模型

Fig.2 IEEE STA1 excitation model

下面求解励磁电压,结合 SG 三阶模型,得到暂态电势表达式。励磁电压求解分为以下 2 种情况:当 PCC 电压瞬时跌落和恢复时,输入信号  $U_{ref} - U_{PCC}$  发生突变,通过将微分方程差分化得到;其他时刻时,输入信号  $U_{ref} - U_{PCC}$  保持恒定,滞后环节变为惯性环节,此

时可以得到其时域表达式。

在电压跌落期间(除了跌落瞬间),有:

$$(1+sT_B)U_1 = U_{ref} - U_{PCC} \quad (3)$$

求解式(3)一阶微分方程,得到:

$$U_1 = c_1 e^{-\frac{1}{T_B}(t-t_0-\Delta t)} + (U_{ref} - U_{PCC}) \quad (4)$$

其中,  $c_1 = U_1(t_0 + \Delta t) - (U_{ref} - U_{PCC})$ ,  $t_0$  为故障初始时刻,  $\Delta t$  为仿真步长;  $t$  为时间。将式(4)代入放大环节得:

$$(1+sT_A)E_{fp} = K_A \left[ c_1 e^{-\frac{1}{T_B}(t-t_0-\Delta t)} + (U_{ref} - U_{PCC}) \right] \quad (5)$$

求解式(5)一阶微分方程,得到:

$$E_{fp} = c_2 e^{-\frac{1}{T_A}(t-t_0-\Delta t)} + K_A (U_{ref} - U_{PCC}) + \frac{T_B}{T_B - T_A} K_A c_1 e^{-\frac{1}{T_B}(t-t_0-\Delta t)} \quad (6)$$

$$c_2 = E_{fp}(t_0 + \Delta t) - K_A (U_{ref} - U_{PCC}) - \frac{T_B}{T_B - T_A} K_A c_1$$

当 PCC 电压跌落至 0 时,重写式(1)中第 3 个方程,得到:

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = -\frac{X'_{d\Sigma}}{X'_d} E'_q + E_f \quad (7)$$

求解式(7)微分方程得到  $E'_q$ 。分为以下 2 种情况:当  $E_f$  小于励磁电压上限值  $E_{fmax}$  时,  $E'_q$  如式(8)所示;当  $E_f$  达到  $E_{fmax}$  时,  $E'_q$  如式(9)所示。

$$E'_q = c_3 e^{-\frac{1}{\tau}(t-t_0-\Delta t)} + \frac{c_2}{T'_{d0}} \frac{\tau T_A}{T_A - \tau} e^{-\frac{1}{T_A}(t-t_0-\Delta t)} + \frac{X'_{d\Sigma}}{X'_d} [E_{f0} + K_A (U_{ref} - U_{PCC})] + \frac{K_A c_1}{T'_{d0}} \frac{T_B^2 \tau}{(T_B - T_A)(T_B - \tau)} e^{-\frac{1}{T_B}(t-t_0-\Delta t)} \quad (8)$$

$$c_3 = E'_q(t_0 + \Delta t) - \frac{X'_{d\Sigma}}{X'_d} [E_{f0} + K_A (U_{ref} - U_{PCC})] - \frac{c_2}{T'_{d0}} \frac{\tau T_A}{T_A - \tau} - \frac{K_A c_1}{T'_{d0}} \frac{T_B^2 \tau}{(T_B - T_A)(T_B - \tau)}$$

$$\tau = X'_{d\Sigma} T'_{d0} / X'_d$$

$$E'_q = c_4 e^{-\frac{1}{\tau}(t-t'_0)} + E_{fmax} \frac{X'_{d\Sigma}}{X'_d} \quad (9)$$

其中,  $c_4 = E'_q(t'_0) - E_{fmax} X'_{d\Sigma} / X'_d$ ,  $t'_0$  为故障后励磁电压恰好为最大值时对应的时刻。

在电压恢复后(除了恢复瞬间),方程为:

$$(1+sT_B)U_1 = 0 \quad (10)$$

求解式(10)一阶微分方程,得到:

$$U_1 = c_5 e^{-\frac{1}{T_B}(t-t_1-\Delta t)} \quad (11)$$

其中,  $c_5 = U_1(t_1 + \Delta t)$ ,  $t_1$  为故障清除时刻。

当  $U_1 \geq (E_{fmax} - E_{f0}) / K_A$  时,励磁电压受其上限值限制,此时  $E_f = E_{fmax}$ 。当  $U_1 < (E_{fmax} - E_{f0}) / K_A$  时,励磁电压小于其上限值,将式(11)代入放大环节,得到  $E_{fp}$  为:

$$E_{fp} = c_6 e^{-\frac{1}{T_A}(t-t'_1)} + \frac{T_B}{T_B - T_A} K_A c_5 e^{-\frac{1}{T_B}(t-t_1-\Delta t)} \quad (12)$$

$$c_6 = E_{\text{fmax}} - E_{\text{f0}} - \frac{T_B}{T_B - T_A} K_{AC5} e^{-\frac{1}{T_B}(t'_1 - t_1 - \Delta t)}$$

其中,  $t'_1$  为故障后  $U_i = (E_{\text{fmax}} - E_{\text{f0}}) / K_A$  的时刻。根据上述推导发现,  $E_i$  与调节参数和电压跌落深度有关,  $E'_q$  变化受  $E_{\text{fmax}}$  制约。

## 2 SBR 投切判据及阻值选取

SG 失稳与故障前机械功率  $P_m$  和故障后电压跌落深度有关, 不同  $P_m$  对应不同临界电压  $U_{\text{PCCcr}}$ 。在 SG 不失稳时投入 SBR, 不利于故障期间有功输出; 而 SG 可能失稳时不投入 SBR, 不能实现 LVRT。

针对不同  $P_m$ , 计算对应的临界电压。检测  $P_m$  和  $U_{\text{PCC}}$ , 当  $U_{\text{PCC}}$  小于对应  $U_{\text{PCCcr}}$  时, 同时为了防止 SBR 反复投切, 需满足功角大于切入功角  $\delta_c$  才投入 SBR。由于 SG 切入功角表明其已快达到失稳的状态, 所需 SBR 阻值很大。很可能需要电网倒送功率, 不利于维持电网频率, 所以不能直接确定切入功角取值。通过改变切入功角值分析 SBR 阻值的变化, 以确定切入功角范围。反之 SG 在并网导则规定时间内不会发生功角失稳。当 PCC 电压恢复正常值时, SBR 切出运行。

令流经 SBR 的电流为  $I_L$ , 用暂态电势确定  $I_L$ :

$$\begin{cases} E'_q = U_{\text{PCC}q} + R_L I_{Lq} + X'_d \Sigma I_{Ld} \\ 0 = U_{\text{PCC}d} + R_L I_{Ld} - X'_q \Sigma I_{Lq} \end{cases} \quad (13)$$

其中, 下标  $d, q$  分别表示  $d, q$  轴参数; 忽略定子电阻和变压器电阻时, 暂态电势到 PCC 的电阻之和, 即为 SBR 阻值  $R_L$ 。

由于  $R_L$  远小于  $X_{q\Sigma}$ , 且当 PCC 电压跌落至 0 时得到  $I_L \approx E'_q / X'_{d\Sigma}$ 。故障期间 SBR 消耗功率  $P_{\text{SBR}} = I_L^2 R_L$ , 会带来散热问题。阻值越大, 对 LVRT 越有利, 但不利于有功输出, 所以需要确定 SBR 最小阻值。

SBR 最小阻值确定是以传统的等面积定则为基础, 对其进行了部分改进。SBR 的作用是减缓 SG 功角的增加速度, 最终使功角不达到其不平衡点。将  $P_{\text{SBR}}$  引入加速面积中, 对加速面积的影响如下: 当达到切入功角时投入 SBR, 故障清除后切出 SBR, 减小了此时刻内的加速面积。而 SBR 未投入时的加速面积和 SBR 切出运行的减速面积与传统的加速面积和减速面积保持一致。由于考虑励磁系统动态控制时, 次暂态电动势的变化导致式(2)有功功率的正弦函数幅值和功角不平衡点的变化, 不能直接通过求解加速面积和减速面积表达式确定 SG 是否失稳。

加速面积和减速面积表达式的建立采用积分的思想, 将每次迭代产生的功率差与功角差的乘积相加, 所以需要确定功率差和功角差。在第 1 节已得到  $E_i$  以及故障期间的  $E'_q$ , 将其代入 SG 及其励磁系统, 此时原有的五阶微分方程在故障期间转化为仅包含  $\delta$  和  $\omega$ , 为状态变量的二阶微分方程, 在故障恢复后转化为仅包含  $\delta, \omega$ , 以及  $E'_q$  为状态变量的三阶微分方程。

但是 SG 功角和转速相互耦合, 仍然很难得到解析解。采用微分方程的数值解法, 求解故障期间的二阶微分方程, 故障恢复后的三阶微分方程, 得到功角差和功率差, 将其代入加速面积和减速面积表达式中。

当  $t_0 < t \leq t_1$  时加速面积由两部分组成:  $S_a = S_{a1} + S_{a2}$ 。当  $\delta < \delta_c$  时 SBR 未投入, 加速面积  $S_{a1}$  为:

$$S_{a1} = \sum [P_m - D(\omega_{r(n+1)} - 1)] (\delta_{n+1} - \delta_n) \quad (14)$$

其中, 下标  $n$  和  $n+1$  分别表示第  $n$  次和第  $n+1$  次迭代。

当  $\delta \geq \delta_c$  时 SBR 已投入, 加速面积  $S_{a2}$  为:

$$S_{a2} = \sum [P_m - D(\omega_{r(n+1)} - 1) - P_{\text{SBR}}] (\delta_{n+1} - \delta_n) \quad (15)$$

功角不稳定平衡点  $\delta_h$  与故障后的  $E'_q$  有关, 通过如下功率平衡关系求解。

$$P_m - P_e(E'_{q(n+1)}, \delta_h, U_{\text{PCC}}) = 0 \quad (16)$$

当  $t > t_1$  且  $\delta < \delta_h$  时减速面积  $S_b$  为:

$$S_b = \sum [P_m - P_e - D(\omega_{r(n+1)} - 1)] (\delta_{n+1} - \delta_n) \quad (17)$$

根据式(14)~(17)确定了加速面积和减速面积, 由等面积定则可知: 当  $S_a > S_b$  时, SG 功角失稳; 当  $S_a = S_b$  时, SG 处于临界稳定; 当  $S_a < S_b$  时, SG 保持功角稳定。将 SBR 阻值由 0 开始逐渐增大, 比较  $S_a$  和  $S_b$  大小。当恰好满足  $S_a < S_b$  时, 对应的 SBR 阻值即为其最小值。SBR 最小阻值确定方法是基于计及励磁系统的动态调节过程等面积定则, 其励磁电压和  $q$  轴暂态电势经过严格的公式推导, 等面积定则又是由改进欧拉法求解建立, 所以该方法是通用的。

故障期间 SBR 是否需要从电网吸收有功, 由故障发生时  $P_m$  和 SBR 阻值决定。当 SBR 消耗的功率  $P_{\text{SBR}}$  恰好为机械功率  $P_m$  时, 得到 SBR 临界阻值:

$$R_{\text{Lcr}} = P_m X'_{d\Sigma} / E_q'^2 \quad (18)$$

当 SBR 阻值大于  $R_{\text{Lcr}}$  时, 需要电网倒送功率以满足 SBR 消耗的功率。

本文选取文献[10]规定的 LVRT 标准, PCC 电压跌落至 0 长达 150 ms。当 SG 额定运行时电磁功率最大, 故障期间 SG 不平衡功率最大, 功角加速最快, 失稳时间最短。选取 SG 为额定运行时的 SBR 阻值可以满足各种运行条件的 LVRT 要求。

## 3 仿真验证与分析

SG 参数为<sup>[23]</sup>:  $T_J = 1.4$  s,  $X_d = 2.06$  p.u.,  $X_q = 2.5$  p.u.,  $X'_d = 0.398$  p.u., 漏抗  $X_l = 0.1$  p.u.,  $T'_{d0} = 7.8$  s。变压器电抗  $X_T = 0.1$  p.u.。励磁系统参数为:  $K_A = 150$ ,  $T_A = 0.01$  s,  $T_B = 0.2$  s,  $T_C = 0.1$  s,  $E_{\text{fmax}} = 5$  p.u.。仿真步长  $\Delta t = 0.001$  s。

### 3.1 SBR 阻值计算

表 1 给出了  $\delta_c = 52.4^\circ$ 、不同 SBR 阻值时采用解析算法得到的加速面积与减速面积(表中数值均为标么值)。可以看出 SBR 阻值越大, 加速面积越小, 减速面积先增大再减小, SG 越容易保持稳定。当  $R_L$  较小时, 制动电阻消耗功率较小, 功角加速过快, SG 容易

表 1 不同 SBR 时加速面积与减速面积  
Table 1 Accelerating and decelerating areas for different SBRs

| $R_L$ | $S_a$  | $S_b$  | 稳定情况 |
|-------|--------|--------|------|
| 0.01  | 1.4982 | 0.0057 | 不稳定  |
| 0.02  | 1.3487 | 0.0409 | 不稳定  |
| 0.03  | 1.2071 | 0.0927 | 不稳定  |
| 0.04  | 1.0732 | 0.1687 | 不稳定  |
| 0.05  | 0.9472 | 0.2612 | 不稳定  |
| 0.06  | 0.8291 | 0.3677 | 不稳定  |
| 0.07  | 0.7188 | 0.4852 | 不稳定  |
| 0.08  | 0.6163 | 0.6072 | 不稳定  |
| 0.09  | 0.5217 | 0.7396 | 稳定   |
| 0.10  | 0.4349 | 0.6397 | 稳定   |

失稳。当  $R_L$  为 0.09 p.u. 时,恰好满足  $S_a < S_b$ ,即 SG 功角在三相故障 150ms 时不会发生功角失稳,显然 SBR 阻值最小值为 0.09 p.u.。

图 3 表示切入功角与 SBR 阻值的关系( $R_L$  为标幺值)。可以看出切入功角越大,SBR 阻值及其变化率越大,SG 越难实现 LVRT。这是由于 SBR 未投入时,加速功率几乎等于机械功率,功角加速最快。切入功角越大,加速面积越大,而减速面积不变,需要更大阻值的 SBR 减小余下故障时间内的加速面积。由式(18)得到 SBR 的临界阻值为 0.16 p.u.,对应的临界切入功角为  $74^\circ$ 。即当切入功角小于  $74^\circ$  时,SBR 不需要电网倒送功率实现 LVRT;反之,需要从电网吸收功率,不利于维持故障期间的电网频率。

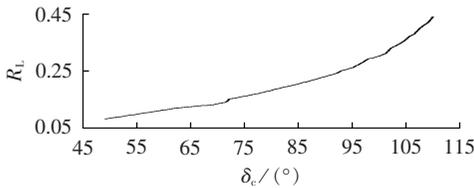


图 3 SBR 最小阻值与切入功角的关系

Fig.3 Curve of minimum SBR vs. switch-in rotor angle

图 4 给出了 SBR 切入判据曲线( $U_{PCCcr}$  和  $P_m$  均为标幺值)。可以看出,当  $P_m$  小于 0.63 p.u. 时,PCC 临界电压为 0,SG 不需要附加措施即可实现 LVRT;当  $P_m$  大于 0.63 p.u. 时,机械功率与 PCC 临界电压近似为线性关系,在额定功率时临界电压约为 0.16 p.u.。机械功率越大,临界电压越高,SG 越难实现 LVRT。当检测到机械功率和 PCC 电压位于此曲线上方时,SG 自身可以实现 LVRT,不需要投入 SBR。

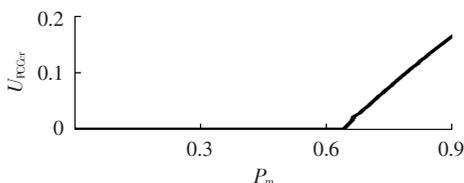
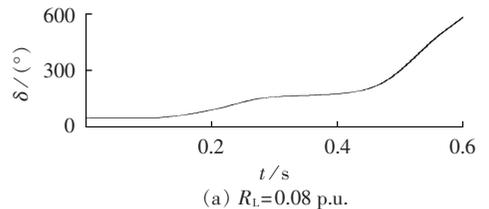


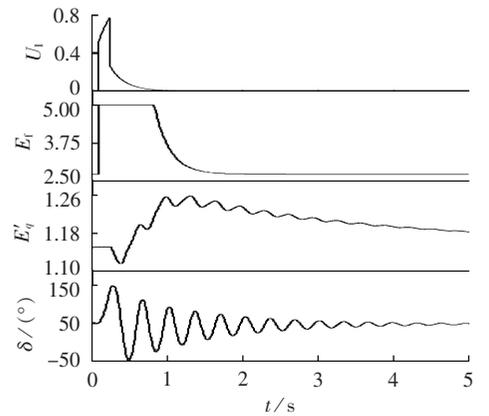
图 4 SBR 切入判据

Fig.4 Switch-in criterion of SBR

为了验证提出的计及励磁系统动态过程的等面积定则选取 SBR 阻值的正确性。同样令  $\delta_c = 52.4^\circ$ ,分别取  $R_L$  为 0.08 p.u.,0.09 p.u.,通过动态仿真得到功角变化曲线如图 5 所示( $U_1, E_f, E'_q$  均为标幺值)。显然当  $R_L$  为 0.09 p.u. 时,SG 可以保持功角稳定,可实现 LVRT。与解析算法得到的 SBR 阻值一致,这是因为误差主要是由  $I_L$  引起,并且基于解析算法求解得到的  $I_L$  与实际值相差较小。故障瞬间由于输入信号  $U_{ref} - U_{PCC}$  突变,经滞后环节后输出值  $U_1$  阶跃上升,而后滞后环节变为惯性环节, $U_1$  按指数函数增大。 $E_f$  迅速达到其最大值  $E_{fmax}$ , $E'_q$  基本维持不变。故障恢复瞬间同样由于输入信号  $U_{ref} - U_{PCC}$  突变,经滞后环节输出值  $U_1$  阶跃下降,而后滞后环节变为惯性环节, $U_1$  按指数函数减小。由于故障恢复后一段时间内  $U_1$  仍较大, $E_f$  仍维持在最大值的时长约 1s。 $E'_q$  先减小再增大,功角振荡 5s 后逐渐稳定。



(a)  $R_L = 0.08$  p.u.



(b)  $R_L = 0.09$  p.u.

图 5 不同 SBR 时 SG 稳定情况

Fig.5 Stability conditions of SG for different SBRs

### 3.2 不同系统参数对 SBR 最小阻值的影响

分别改变不同的系统参数(励磁电压上限值、惯性时间常数、 $q$  轴同步电抗、 $d$  轴暂态电抗、变压器电抗),使 SBR 最小阻值由 0.09 p.u. 减小到 0.07 p.u.,动态仿真得到的功角变化曲线如图 6 所示。需要说明的是:前述的等面积定则同样适用于研究参数变化时 SG 的功角稳定性。此处为了更加直观地表明 SG 参数对其功角稳定性的影响,采用动态仿真绘制功角变化曲线。

与原参数对比,可以看出励磁电压上限值越大,暂态电动势越大,故障恢复后电磁功率越大,减速面

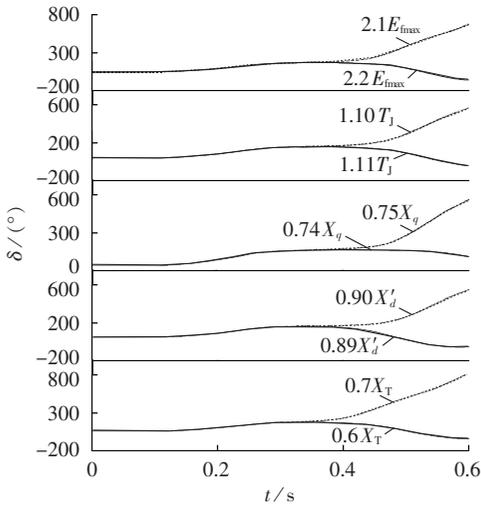


图 6 不同参数对 SBR 阻值的影响

Fig.6 Effect on SBR for different parameters

积越大,需要的 SBR 阻值越小。

惯性时间常数越大,转子和功角加速越慢,相同故障时功角失稳所需时间越长,较小阻值的 SBR 即可实现 LVRT。

$q$  轴同步电抗、 $d$  轴暂态电抗以及变压器电抗影响故障恢复后的电磁功率,进而影响减速面积。三者的值越小,故障后电磁功率值越大,减速面积越大,需要的 SBR 阻值越小。

比较而言,系统参数对 SBR 阻值的影响从大到小依次为: $d$  轴暂态电抗、惯性时间常数、 $q$  轴同步电抗、变压器电抗、励磁电压上限值。

此部分得到的结论与基于等面积定则获得的 SBR 最小阻值之间并不矛盾,两者相互独立。解释如下:发电机组参数对 SBR 最小阻值的影响是动态仿真得到功角变化,通过改变不同的系统参数使得所需要的 SBR 最小阻值由 0.09 p.u. 减小到 0.07 p.u.,对于新安装 BPP 参数选择有参考意义。而基于等面积定则得到 SBR 最小阻值的解析算法,是针对原始参数的解析算法,目的是在保证选取 SBR 阻值精度的同时节省动态仿真时间,对应的 SBR 最小阻值为 0.09 p.u.。图 5 是对解析算法 SBR 最小阻值选取正确性的动态仿真验证。

## 4 结论

本文采用 SBR 实现 BPP 中 SG 的 LVRT,首次提出计及励磁系统动态控制的等面积定则,确定 SBR 最小阻值的解析算法,得到如下结论。

**a.** SG 的功角稳定性与机械功率和 PCC 电压跌落深度有关。机械功率越大,PCC 临界电压越高,相同电压跌落深度下 SG 越容易失稳。

**b.** 切入功角越大,SBR 阻值和阻值变化率越大。切入功角大于其临界值时,需要电网倒送功率。

**c.** SG 惯性时间常数或励磁电压上限值越大, $q$  轴同步电抗、 $d$  轴暂态电抗或变压器电抗越小,LVRT 需要的 SBR 阻值越小。

**d.** 系统参数对 SBR 阻值的影响从大到小依次为: $d$  轴暂态电抗、惯性时间常数、 $q$  轴同步电抗、变压器电抗、励磁电压上限值。

## 参考文献:

- [1] 严鑫,吴明锋. 生物质发电及能源化综合利用[J]. 山西电力, 2014(6):52-55.  
YAN Xin,WU Mingfeng. Biomass power generation and comprehensive energy utilization[J]. Shanxi Electric Power,2014(6): 52-55.
- [2] 谭会征,李永丽,陈晓龙,等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):31-37.  
TAN Huizheng,LI Yongli,CHEN Xiaolong,et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8): 31-37.
- [3] 赵卓立,杨苹,蔡泽祥,等. 含风电孤立中压微电网暂态电压稳定协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):1-9.  
ZHAO Zhuoli,YANG Ping,CAI Zexiang,et al. Cooperative control of transient voltage stability for islanded medium-voltage microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 1-9.
- [4] 王虹富,林国庆,邱家驹,等. 利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统自动化,2008,32(18):81-85.  
WANG Hongfu,LIN Guoqing,QIU Jiaju,et al. Improvement of low voltage ride-through capability of wind farms by use of series dynamic braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 81-85.
- [5] 汤凡,刘天琪,李兴源. 通过串联制动电阻改善恒速异步发电机风电场暂态稳定性[J]. 电网技术,2010,34(4):163-167.  
TANG Fan,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Improving transient stability of wind farm consisting of fixed speed induction generator by series connected dynamic braking resistors[J]. Power System Technology,2010,34(4):163-167.
- [6] MUYEEN S M. A combined approach of using an SDBR and a STATCOM to enhance the stability of a wind farm[J]. IEEE System Journal,2015,9(3):922-932.
- [7] 栗然,王倩,卢云,等. Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):101-107.  
LI Ran,WANG Qian,LU Yun,et al. Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 101-107.
- [8] 李生虎,许志峰. 直驱永磁同步电机卸荷电阻取值范围及分组策略[J]. 电网技术,2013,37(7):1868-1873.  
LI Shenghu,XU Zhifeng. Range and group strategy of dump resistance for direct-drive permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology,2013,37(7):1868-1873.
- [9] 李生虎,安锐,许志峰,等. 混合风电场中 PMSG 协助感应发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):21-27.  
LI Shenghu,AN Rui,XU Zhifeng,et al. Coordinated LVRT of IG and PMSG in hybrid wind farm[J]. Electric Power Automa-

- tion Equipment, 2015, 35(2):21-27.
- [10] BDEW. Technical guideline:generating plants connected to the medium-voltage network[S]. Berlin,Germany;BDEW,2008.
- [11] 鲍薇,胡学浩,何国庆,等. 分布式电源并网标准研究[J]. 电网技术,2012,36(11):46-52.
- BAO Wei,HU Xuehao,HE Guoqing,et al. Study on standard for grid-integration of distributed resources[J]. Power System Technology,2012,36(11):46-52.
- [12] LI S. Effect of rotor speed change on electromagnetic transient and angular swing of synchronous generators[J]. Electric Power Components and Systems,2012,40(13):1486-1500.
- [13] YANG S,SHAGAR V G,UKIL A,et al. Evaluation of low voltage ride-through capability of synchronous generator connected to a grid[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver,USA:IEEE,2015:1-5.
- [14] XYNGI I,ISHCHENKO A,POPOV M,et al. Transient stability of a distribution network with distribute generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(2):1102-1104.
- [15] CALDERARO A,MILAN OVIC J V,KAYIKCI M,et al. The impact of distributed synchronous generators on quality of electricity supply and transient stability of real distribution network[J]. Electric Power Systems Research,2009,79(1):134-143.
- [16] RAZZAGHI R,DAVARPANAH M,SANAYE-PASAND M. A novel protective scheme to protect small-scale synchronous generators against transient instability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(4):1659-1667.
- [17] KALYANI S,PRAKASH M,EZHILARASI G A. Transient stability studies in SMIB system with detailed machine models [C]//International Conference on Recent Advancements in Electrical,Electronics and Control Engineering. Sivakasi,India: IEEE,2011:459-464.
- [18] BASLER M J,SCHAEFER R C. Understanding power-system stability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2008,44(2):463-474.
- [19] PAUDYAL S,RAMAKRISHNA G,SACHDEV M S. Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(2):600-609.
- [20] CHOWDHURY M A,HOSSEINZADEH N,SHEN W X,et al. Comparative study on fault responses of synchronous generators and wind turbine generators using transient stability index based on transient energy function[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,51(10):145-152.
- [21] SUN Y,LI X,ZHAO M,et al. New Lyapunov function for transient stability analysis and control of power systems with excitation control[J]. Electric Power Systems Research,2001,57(2):123-131.
- [22] IEEE PES. Recommended practice for excitation system models for power systems stability analysis:IEEE Std 421.5-2005[S]. New York,USA:IEEE Press,2006.
- [23] SALIM R H,RAMOS R A. A model-based approach for small-signal stability assessment of unbalanced power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):2006-2014.

#### 作者简介:



李生虎

李生虎(1974—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术在电力系统中的应用(**E-mail**: shenghuli@hfut.edu.cn);

安锐(1990—),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,研究方向为风电系统分析与控制(**E-mail**: anrui135@163.com);

孙琪(1992—),女,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为风电系统分析与控制。

## SBR-based LVRT of synchronous generators in biomass power plants

LI Shenghu, AN Rui, SUN Qi

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** As the LVRT(Low-Voltage Ride-Through) method for large-scale SG(Synchronous Generator) is not suit for the SG in BPP(Biomass Power Plant),SBR(Series Braking Resistor) is applied to achieve the LVRT of SG in BPP. An analytical method based on the equal area criterion considering the dynamic control of excitation system is proposed to calculate the resistance of SBR. Based on the excitation control system and SG model,the active power of SBR is quantified and introduced to the accelerating area for building the expressions of accelerating area and decelerating area. Combined with the mechanical power and switch-in rotor angle,the equal area criterion is applied to deduce the analytical method for calculating the minimum SBR to meet the requirements of LVRT. The influences of different system parameters on SBR are analyzed for determining the parameters of new BPP. The results of dynamic simulation verify the correctness of the introduced analytical method. It is found that,larger inertia of SG or upper limit of field voltage,smaller  $q$ -axis synchronous reactance or  $d$ -axis transient reactance or transformer reactance and smaller mechanical power or switch-in rotor angle will require smaller resistance of SBR. Arranged from bigger to smaller according to their impacts on SBR,the influencing system parameters are  $d$ -axis transient reactance,SG inertia time constant, $q$ -axis synchronous reactance,transformer reactance and upper field voltage limit.

**Key words:** low-voltage ride-through; synchronous generators; biomass power plants; series braking resistor; equal area criterion