

# 混合风电场中 PMSG 协助感应发电机低电压穿越

李生虎<sup>1</sup>, 安锐<sup>1</sup>, 许志峰<sup>2</sup>, 董王朝<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;  
2. 国家电网江西省电力公司检修分公司, 江西 南昌 330029)

**摘要:** 针对直驱永磁同步机组(PMSG)协同感应风电机组(IG)低电压穿越(LVRT)问题, 提出 PMSG 最少台数的定量算法。根据转矩平衡关系, 计算 IG 滑差失稳的临界转差率。根据临界转差率和故障持续时间, 对转矩平衡方程积分, 得到 IG 不失稳时公共连接点临界电压。根据并网导则的最严重电压跌落, 推导协助 IG LVRT 所需无功和 PMSG 最少台数。给出动态仿真结果以验证协同 LVRT 效果, 量化了理论推导误差。发现 IG 惯性时间常数或转子电阻越大, 机械转矩或定子电抗越小, 故障时间越短, 临界电压越低, PMSG 越容易协助 IG LVRT; 对临界电压影响从大到小依次为 IG 机械转矩、故障时间、IG 转子电阻、IG 惯性时间常数和定子电抗。

**关键词:** 风电场; 低电压穿越; 感应发电机; 直驱永磁同步发电机; 临界电压

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.004

## 0 引言

低电压穿越(LVRT)是风电并网的基本要求之一<sup>[1-3]</sup>。在外网故障下, 希望风电机组保持并网, 提供无功支持以维持电压<sup>[4-5]</sup>, 缩短故障后恢复过程。

感应发电机(IG)结构和控制简单<sup>[6-7]</sup>, 在早期风电建设中广为应用。但是其从电网吸收无功, 为避免故障期间滑差失稳<sup>[8]</sup>, 需要增加并补设备或串联制动电阻<sup>[9-10]</sup>, 从而增加投资。因此目前新建风电机组多为双馈和直驱型机组<sup>[11-13]</sup>, 与现有 IG 机组一起, 形成混合风电场。

对于直驱永磁同步发电机(PMSG), 通过在直流侧加入卸荷电路或储能装置<sup>[14-15]</sup>可以实现 LVRT。网侧变流器(GSC)无功出力有助于维持电压和减少事故后恢复时间<sup>[16]</sup>。PMSG 富余无功容量可提高公共连接点(PCC)电压, 有可能帮助同一风电场内相近 IG 机组故障穿越, 避免新增投资。

对于利用 PMSG 协助 IG LVRT 问题, 文献[17-18]中 PMSG 故障期间没有向电网输送有功, 未达到连续供电的要求。文献[19-20]在故障期间可以提供有功支持, 但仿真故障尺度较短, 不足以验证协同 LVRT 效果。文献[18-20]验证了给定台数时可以协同 LVRT, 但并未给出协同 LVRT 所需 PMSG 的最少容量或台数的定量算法。文献[17]给出了 PMSG 与 IG 的大致比例, 但是仅通过动态仿真结果, 没有定量算法, 因此缺乏普遍应用价值。文献[6]提出计算 IG 临界切除时间的理论算法, 但是由于取电网电压为零, 计算过程虽然简单但是理想化。

针对包含 PMSG 和 IG 的混合风电场, 本文研究了利用 PMSG 富余无功容量帮助 IG LVRT 的可行性, 提出了帮助 IG LVRT 的 PMSG 最少台数的定量算法。首先将 IG 电磁转矩用电压和转差率的函数表示, 根据转矩平衡关系, 计算导致 IG 滑差失稳的临界转差率。将故障期间电磁转矩表示为 PCC 电压和转差率的函数, 根据临界转差率和故障持续时间, 对转矩平衡方程积分, 得到 IG 不失稳时 PCC 临界电压。根据 PCC 到电网间电压降落关系, 得到将 PCC 电压提高到临界电压所需增发无功。在保证 PMSG 自身 LVRT 前提下, 通过改变 GSC 无功参考值予以实现。根据风电并网导则确定的最严重电压跌落场景, 计算协助 IG LVRT 所需 PMSG 最少台数。文中给出动态仿真结果, 验证了理论分析的有效性, 分析了理论推导误差原因以及临界电压的影响因素。

## 1 PCC 临界电压计算

图 1 为协同 LVRT 的风电系统结构, PMSG 和 IG 分别通过升压变连接至 PCC, 然后并入电网。其中, 1 端为电网; 2 端为 PCC;  $U_1, U_2, I_1, I_2$  分别为电网和 PCC 处的电压、电流;  $X_{TA}, X_{TB}, X_{TC}$  分别为变压器  $T_A, T_B, T_C$  电抗;  $R_G, X_G$  分别为 GSC 电阻和电抗;  $R_L, X_L$  分别为线路电阻和电抗;  $R_d$  为 GSC 直流侧卸荷电阻。令  $X_1 = X_L + X_{TC}, R_1 = R_L, Z = R_1 + jX_1$ 。

图 2 给出 IG 等值电路。其中,  $R_s, X_s, R_r, X_r$  分别为定子和转子的电阻、电抗;  $X_m$  为激磁电抗;  $s$  为转差率;  $I_s$  为定子电流;  $I_r$  为转子电流。令  $X = X_s + X_r + X_{TB}$ 。

基于戴维南定理, 计算等值电压  $U_{TH}$  和等值阻抗  $Z_{TH}$  如下, 其中  $Z_M = jX_m, Z_s = R_s + jX_s + jX_{TB}$ 。

$$U_{TH} = \frac{Z_M}{Z_s + Z_M} U_2 \quad (1)$$

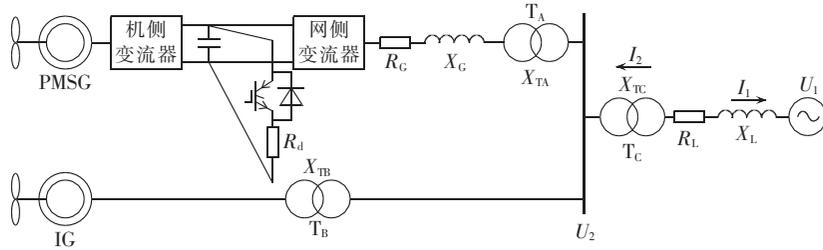


图 1 混合风电场结构

Fig.1 Configuration of hybrid wind farm

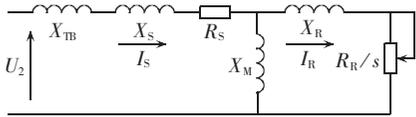


图 2 IG 等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of IG

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{Z_S Z_M}{Z_S + Z_M} \quad (2)$$

IG 电磁转矩  $T_E$  表示为式(3)。由于  $sR_{TH}$  远小于  $R_R$ ，可以忽略， $T_E$  简化为式(4)。

$$T_E = \frac{R_R I_R^2}{s} = \frac{U_{TH}^2 R_R s}{(sR_{TH} + R_R)^2 + s^2(X_{TH} + X_R)^2} \quad (3)$$

$$T_E = \frac{U_{TH}^2 R_R s}{R_R^2 + s^2(X_{TH} + X_R)^2} \quad (4)$$

IG 机械转矩  $T_M$  为：

$$T_M = \frac{0.5 C_p \rho \pi R^2 v^3}{(1-s) \omega_s S_N} \quad (5)$$

其中， $\rho$  为空气密度； $R$  为风轮机的半径； $v$  为风速； $C_p$  为风电机组的风能利用系数； $\omega_s$  为同步角速度标幺值； $S_N$  为基准容量。

传动系统采用单质量块模型，则转子运动方程为：

$$2(H_G + H_M) \frac{ds}{dt} = -T_M - T_E \quad (6)$$

其中， $H_G$ 、 $H_M$  分别为发电机、风力机的惯性时间常数。

定义系数  $K_1 - K_7$ ，具体如下：

$$K_1 = \frac{0.5 C_p \rho \pi R^2 v^3}{(1-s) \omega_s S_N}, \quad K_2 = -U_{TH}^2 R_R, \quad K_3 = R_R^2$$

$$K_4 = (X_{TH} + X_R)^2, \quad K_5 = 2(H_G + H_M)$$

$$K_6 = -\frac{K_2}{K_1 K_4}, \quad K_7 = \frac{K_3}{K_4}$$

故障期间认为转差率和风能利用系数变化不大，近似认为  $K_1$  为常数，将式(4)和(5)代入式(6)，则式(6)变为：

$$K_5 \frac{ds}{dt} = \frac{K_2 s}{K_3 + s^2 K_4} - K_1 \quad (7)$$

令式(7)等号左侧为 0，得 IG 初始转差率  $s_0$  和临界转差率  $s_{crit}$  [6]：

$$s_0 = \frac{K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1^2 K_3 K_4}}{2K_1 K_4} \quad (8)$$

$$s_{crit} = \frac{K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1^2 K_3 K_4}}{2K_1 K_4}$$

将带有  $s$  的项移到方程等号的左边，带有  $t$  的项移到方程等号右边。左边对  $s$  进行积分，积分区间为  $s_0$  到  $s_{crit}$ ；右边对  $t$  进行积分，积分区间为故障时间  $t_{fault}$ 。左右两侧积分区间的含义为：转子转速从初始转差率  $s_0$  加速到临界转差率  $s_{crit}$  所用时间恰好为  $t_{fault}$ 。如果故障时间变长则 IG 滑差失稳。

当  $K_6^2 < 4K_7$  时，得到式(9)，其中  $t_1$  为故障结束时间。为了使计算得到的故障初始时间  $t_0$  与实际发生故障的时间保持一致，引入积分常数  $C_1$ ，由于临界电压为从初始转差率到临界转差率积分之差，所以  $C_1$  并不影响临界电压的计算。

$$-\frac{K_5}{K_1 K_4} \left( K_4 s + \frac{K_2}{2K_1} \ln |s^2 + K_6 s + K_7| - \frac{K_2}{K_1} \frac{K_6}{\sqrt{4K_7 - K_6^2}} \arctan \frac{2s + K_6}{\sqrt{4K_7 - K_6^2}} \right) + C_1 \Big|_{s_0}^{s_{crit}} = t_1 - t_0 = t_{fault} \quad (9)$$

当  $K_6^2 > 4K_7$  时，得到式(10)， $C_2$  与  $C_1$  意义相同。由于  $K_2$  中包括  $U_{TH}$ ，通过式(9)或(10)可确定给定故障时间内保证 IG 不失稳的 PCC 临界电压。

$$-\frac{K_5}{K_1 K_4} \left( K_4 s + \frac{K_2}{2K_1} \ln |s^2 + K_6 s + K_7| - \frac{K_2}{K_1} \frac{K_6}{\sqrt{K_6^2 - 4K_7}} \ln \left| \frac{2s + K_6 - \sqrt{K_6^2 - 4K_7}}{2s + K_6 + \sqrt{K_6^2 - 4K_7}} \right| \right) + C_2 \Big|_{s_0}^{s_{crit}} = t_1 - t_0 = t_{fault} \quad (10)$$

由以上推导可见，IG 临界电压影响因素包括其惯性时间常数、临界转差率、转矩不平衡量以及故障持续时间。

## 2 协同 LVRT 所需 PMSG 台数

由于 GSC 容量限制，每台 PMSG 可增发无功是有限的。根据最严重电压跌落场景，计算将 PCC 电压提高到临界电压所需的最少无功，进而可确定所需 PMSG 最少台数。

电网故障时，GSC 电流参考值控制策略如图 3 所示。其中， $U_{dc}$  为直流母线电压； $Q_{grid}$  为 PCC 处无功功率； $I_{gd}$ 、 $I_{gq}$  分别为 GSC 的  $d$  轴和  $q$  轴电流；上标 \* 表示参考值。为使故障期间仍能对电网提供有功支持，取 GSC 最大电流为  $I_{lim}$ ，分解到  $q$  轴限幅为  $I_{gqlim}$ 。故

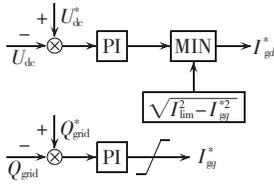


图 3 GSC 改进无功控制

Fig.3 Enhanced var control of GSC

障期间为尽可能地向电网输送无功以抬高 PCC 电压,重新设定 GSC 有功和无功电流参考值。无功电流参考值通过输向 PCC 无功功率 PI 调节器得到。通过比较直流电压 PI 调节器输出值和  $\sqrt{I_{\text{lim}}^2 - I_{\text{gt}}^2}$ , 得到最小值即为有功电流参考值。

在同一风电场内,近似认为每台 IG 风速大致一致,将其等值为 1 台。当电网电压跌落时,假设故障期间 IG 的平均转差率为  $s_c$ ,则 IG 向 PCC 输送的有功  $P_{\text{IG}}$  和无功  $Q_{\text{IG}}$  为:

$$\begin{cases} P_{\text{IG}} = -\frac{U_{2d}^2 R_{\text{R}} s_c}{R_{\text{R}}^2 + s_c^2 X^2} \\ Q_{\text{IG}} = \frac{R_{\text{R}}^2 + s_c^2 (X^2 + X X_{\text{M}})}{X_{\text{M}} R_{\text{R}} s_c} P_{\text{IG}} \end{cases} \quad (11)$$

整个风电场输向 PCC 的有功  $P_2$  和无功  $Q_2$  为:

$$\begin{cases} P_2 = n P_{\text{PMSG}} + P_{\text{IG}} \\ Q_2 = n Q_{\text{PMSG}} + Q_{\text{IG}} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $P_{\text{PMSG}}$ 、 $Q_{\text{PMSG}}$  分别为每台 PMSG 输向 PCC 的有功功率和无功功率; $n$  为 PMSG 台数。

$$\begin{cases} P_{\text{PMSG}} = U_{2d} I_{\text{gd}} + U_{2q} I_{\text{gq}} \\ Q_{\text{PMSG}} = U_{2q} I_{\text{gd}} - U_{2d} I_{\text{gq}} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $U_{2d}$ 、 $U_{2q}$  分别为 PCC 处  $d$  轴和  $q$  轴电压。采用电压定向  $d$  轴,  $U_{2d} = U_2$ ,  $U_{2q} = 0$ 。认为故障期间,总电流和  $q$  轴电流都已达到幅值时,将其代入式(13)求取  $P_{\text{PMSG}}$ 、 $Q_{\text{PMSG}}$ 。

为实现 PMSG 和 IG 协同 LVRT,首先要保证 PMSG 自身 LVRT,本文采用在直流侧增加卸荷电路的控制策略;其次要保证 GSC 容量限制,忽略 GSC 出线有功损耗,将  $P_{\text{PMSG}}$ 、 $Q_{\text{PMSG}}$  代入式(14)、(15)保证其成立。

$$\begin{cases} P_{\text{GSC}} = P_{\text{PMSG}} \\ Q_{\text{GSC}} = Q_{\text{PMSG}} + I_{\text{lim}}^2 (X_{\text{TA}} + X_{\text{C}}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\sqrt{P_{\text{GSC}}^2 + Q_{\text{GSC}}^2} \leq S_{\text{lim}} \quad (15)$$

其中,  $P_{\text{GSC}}$ 、 $Q_{\text{GSC}}$  分别为 GSC 输出的有功功率和无功功率; $S_{\text{lim}}$  为 GSC 的最大容量。

当电网电压跌落时,将 PCC 电压抬高到其临界电压,所需 PMSG 台数由 PCC 处功率决定。此时已知电网电压和 PCC 功率,求取 PCC 电压。为避免迭代,建立以下直接求解算法:

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ -I_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中,  $a_{11}$ 、 $a_{12}$ 、 $a_{21}$ 、 $a_{22}$  为相应矩阵元素。令:

$$\begin{cases} \left( a_{11} - \frac{a_{12} a_{21}}{a_{22}} \right) U_1 = d_1 \angle \theta \\ \frac{a_{12}}{a_{22}} S_2^* = d_2 = d_{2r} + j d_{2i} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $d_1$ 、 $d_2$  为常数; $\theta$  为式(18)中第一个方程等式左侧量的相角; $S_2^* = -(P_2 - j Q_2)$ 。

$$U_2 = \sqrt{\frac{(2d_{2r} + d_1^2) + (2d_{2r} + d_1^2)^2 - 4d_2^2}{2}} \quad (19)$$

$$\begin{cases} d_{2r} = R_1 P_2 + X_1 Q_2 \\ d_{2i} = R_1 Q_2 - X_1 P_2 \end{cases} \quad (20)$$

将  $P_2$ 、 $Q_2$  代入式(19)、(20),计算将 PCC 电压抬高到临界电压所需的 PMSG 台数  $n$ 。显然,临界电压越低,所需无功容量越小,PMSG 台数越少。

本文在保证 PMSG 自身 LVRT 的条件下协助 IG LVRT。在故障期间,PMSG 输出有功不变。通过抬高机端电压避免 IG 滑差失稳,IG 输出有功增大,从而整个风电场有功输出增加。

协同 LVRT 的临界条件取决于 PCC 的临界电压、GSC 的极限容量以及 PMSG 的 LVRT 控制策略。由于 IG 的机械转矩越大,故障持续时间越长,IG 越容易失稳,所以本文计算了 IG 在额定运行情况下按照并网导则规定的故障时间下 PCC 的临界电压。在额定运行方式下,GSC 富余容量最小,协助 IG LVRT 能力最弱,所以由此计算的 PMSG 台数可以满足其他运行方式下协同 LVRT。

本文没有改变 PMSG 原有撬棒控制,只是通过控制 PMSG 发出无功功率来抬高 PCC 电压确保 IG 成功穿越,而 IG 滑差失稳只与端电压有关,因此没有考虑 IG 和 PMSG 撬棒控制的协调性。更深一层考虑,将同时协调有功和无功优化,其中有功控制包括正常有功出力控制和故障时撬棒控制,但是解决方案尚未确定。从 PMSG 安全角度考虑,撬棒控制优先程度高于帮助 IG LVRT,两者不便统一协调优化。

### 3 仿真分析

风电场中 IG 为 10 台,参数为: $R_s = 0.0121$  p.u.,  $X_s = 0.0742$  p.u.,  $R_r = 0.008$  p.u.,  $X_r = 0.1761$  p.u.,  $X_m = 2.7626$  p.u.,  $H_c = 0.5$  s,  $H_m = 2.5$  s。PMSG 参数:磁通  $\phi = 1.4$  p.u.,  $d$  轴电抗  $X_d = 1$  p.u.,  $q$  轴电抗  $X_q = 0.7$  p.u.,  $R_c = 0.02$  p.u.,  $X_c = 0.02$  p.u.,  $R_d = 6$  p.u.。变压器参数:  $X_{\text{TA}} = X_{\text{TB}} = 0.08$  p.u.,  $X_1 = 0.005$  p.u.,  $R_1 = 0.0005$  p.u.,  $I_{\text{lim}} = 1.6$  p.u.,  $I_{\text{gtlim}} = 1.55$  p.u.,  $S_{\text{lim}} = 1.6$  p.u.,  $s_c = -0.05$ 。单台 IG 与 PMSG 的额定容量均为 1 MW。基准功率取 1 MW。初始时刻,PMSG 和 IG 均运行在额定情况下。按我国风电并网导则要求,最严重情况下电网电压跌至 0.2 p.u.,持续时间 0.625 s。

### 3.1 理论推导结果

计算初始转差率和临界转差率,得到保证 IG 不失稳时 PCC 临界电压。然后将 PCC 电压抬高到临界电压,计算所需 PMSG 台数。具体计算步骤如下。

额定情况下,通过 PMSG 无功补偿使得 PCC 电压为 1.05 p.u.,来保证 IG 机端正常电压接近 1 p.u.,IG 额定机械转矩为 1 p.u.。通过式(8)得到初始转差率  $s_0$  和临界转差率  $s_{crit}$ :

$$s_0 = \frac{-0.0079 + 0.006}{0.2076} = -0.0092$$

$$s_{crit} = \frac{-0.0079 - 0.006}{0.2076} = -0.0669$$

将初始转差率  $s_0$  和临界转差率  $s_{crit}$  代入式(9),得:

$$t_0 = -57.7988(0.1038s_0 - 0.004U_{TH}^2 \times \ln|s_0^2 + 0.0771U_{TH}^2s_0 + 0.00062| + 0.00062 \frac{U_{TH}^4}{\sqrt{0.0025 - 0.0059U_{TH}^4}} \times \arctan \frac{2s_0 + 0.0771U_{TH}^2}{\sqrt{0.0025 - 0.0059U_{TH}^4}} + C_1$$

$$t_1 = -57.7988(0.1038s_1 - 0.004U_{TH}^2 \times \ln|s_1^2 + 0.0771U_{TH}^2s_1 + 0.00062| + 0.00062 \frac{U_{TH}^4}{\sqrt{0.0025 - 0.0059U_{TH}^4}} \times \arctan \frac{2s_1 + 0.0771U_{TH}^2}{\sqrt{0.0025 - 0.0059U_{TH}^4}} + C_1$$

得到保证 IG 不失稳时 PCC 临界电压  $U_2$  为 0.62 p.u.,满足  $K_6 < 4K_7$  的条件。然后求取故障期间每台 PMSG 和所有 IG 的有功和无功出力:

$$\begin{cases} P_{PMSG} = 0.62 \times \sqrt{1.6^2 - 1.55^2} = 0.246 \text{ p.u.} \\ Q_{PMSG} = 0.62 \times 1.55 = 0.961 \text{ p.u.} \\ P_{IG} = -10 \times \frac{0.62^2 \times 0.008 \times (-0.05)}{0.008^2 + 0.05^2 \times 0.3303^2} = 4.566 \text{ p.u.} \\ Q_{IG} = \frac{0.008^2 + 0.05^2 \times (0.3303^2 + 0.3303 \times 2.7626)}{2.7626 \times 0.008 \times (-0.05)} \times 4.566 = -10.8 \text{ p.u.} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_2 = 4.566 + 0.246n \\ Q_2 = 0.961n - 10.8 \end{cases}$$

当电网电压跌落至 0.2 p.u. 时,可得  $d_1 = 0.2$  p.u.,此时有:

$$\begin{cases} d_{2r} = 0.0005P_2 + 0.005Q_2 \\ d_{2i} = 0.0005Q_2 - 0.005P_2 \end{cases}$$

为了将 PCC 电压  $U_2$  抬高到其临界电压,计算所需 PMSG 台数,将  $d_{2r}$  和  $d_{2i}$  代入式(19),得到所需 PMSG 台数为 70 台。

$$\sqrt{\frac{2d_{2r} + 0.2^2 + (2d_{2r} + 0.2^2)^2 - 4(d_{2r}^2 + d_{2i}^2)}{2}} = 0.62 \text{ p.u.}$$

以下进行动态仿真分析,以检验理论推导结果的正确性。

### 3.2 IG 失稳临界电压

取 PCC 电压分别为 0.59 p.u. 和 0.58 p.u.,图 4 给出 IG 转子转速  $\omega_r$ (标么值,后同)的变化情况。当 PCC 电压为 0.59 p.u. 时,故障期间转子转速增大,故障结束后由于定子电流和转子电流很大,机端电压不能瞬时恢复到故障前的值,此时机械转矩仍大于电磁转矩,转子继续加速。经过振荡机端电压逐渐恢复到故障前的值,转子逐渐减速,最后恢复正常转速。当 PCC 电压为 0.58 p.u. 时,故障期间转子加速,故障恢复后转子一直加速,机械转矩始终大于电磁转矩,IG 滑差失稳。则临界电压为 0.59 p.u.,与理论计算值误差 0.03 p.u.,误差原因在于实际机械转矩随着转差率的变化而改变。

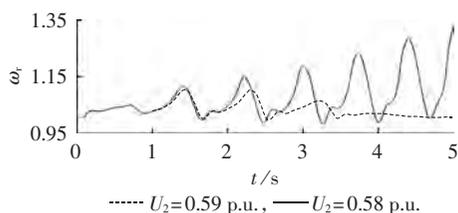
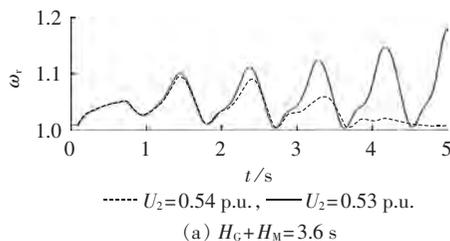


图 4 不同电压跌落时转速变化

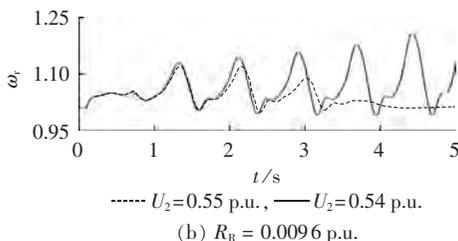
Fig.4 Rotor speed variation for different voltage drops

分别将 IG 惯性时间常数、转子电阻增加 20%,机械转矩、定子电抗减小 20%,故障持续时间缩短 20%,图 5 给出了临界电压变化。

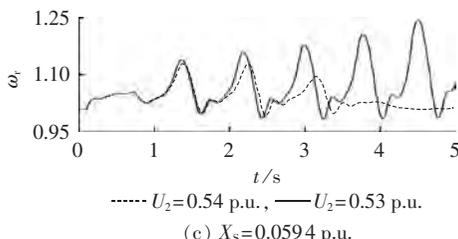
图 5(a)~(c)中,IG 惯性时间常数、转子电阻增大,定子电抗减小,增加机组惯性或电磁转矩,转子加速变慢,所以临界电压分别减小到 0.54 p.u.、0.55 p.u.、0.54 p.u.。图 5(d)中,故障持续时间缩短,时间



(a)  $H_c + H_m = 3.6 \text{ s}$



(b)  $R_r = 0.0096 \text{ p.u.}$



(c)  $X_s = 0.0594 \text{ p.u.}$

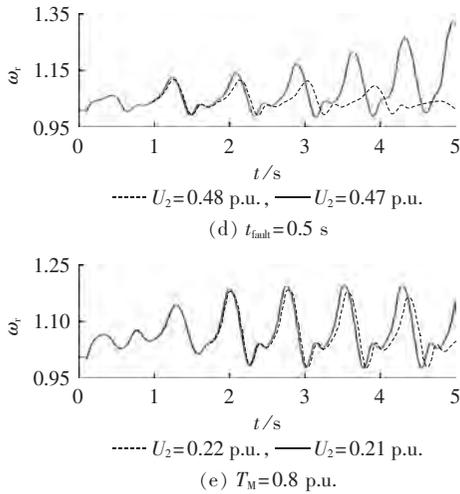


图 5 临界电压影响因素

Fig.5 Contributing factors to critical voltage

积分区间变小,转子加速时间变短,更难达到临界转差率,所以临界电压减小到 0.48 p.u.。图 5(e)中,机械转矩减小,转差率积分区间增加,机械转矩和电磁转矩差值变小,所以临界电压减小到 0.22 p.u.。

综上所述,IG 惯性时间常数或转子电阻越大,IG 机械转矩或 IG 定子电抗越小,故障时间越短,临界电压越低。对临界电压影响从大到小依次为 IG 机械转矩、故障时间、IG 转子电阻、IG 惯性时间常数和定子电抗。

### 3.3 协同 LVRT 所需 PMSG 台数

取 PMSG 不同台数,图 6 给出每台 PMSG 直流母线电压和输向 PCC 有功(标么值),卸荷电阻投入避免了直流母线过电压,PMSG 可以保证自身 LVRT。

图 7 给出了每台 PMSG 输向 PCC 无功、PCC 电

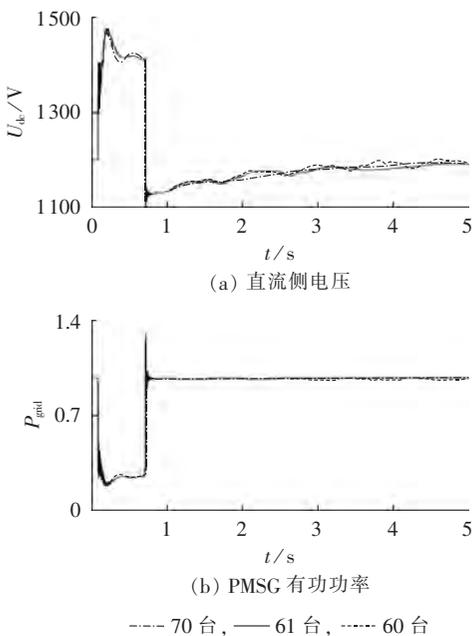


图 6 PMSG LVRT 效果

Fig.6 LVRT effect of PMSG

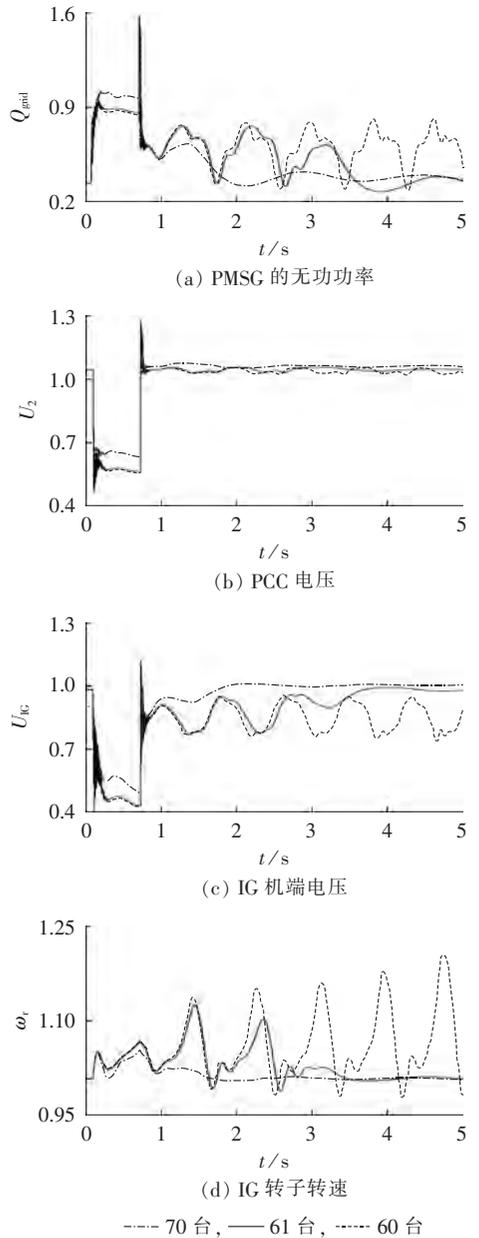


图 7 PMSG 协助 IG LVRT 效果

Fig.7 Coordinated LVRT of IG and PMSG

压、IG 机端电压和转速(均为标么值)曲线,以检验协同 LVRT 效果。故障期间,改变 GSC 无功参考值,增发无功功率抬高 PCC 电压、IG 机端电压,减小 IG 转速上升速度,使得 PCC 电压大于临界电压以满足 IG LVRT。

PMSG 台数越多时,其无功功率、IG 机端电压和转速恢复越快,协同 LVRT 效果越好。基于本文风电机组参数和控制策略,为保证 IG LVRT,需要至少 61 台 PMSG,即 IG 和 PMSG 台数比约为 1:7,可以保证 IG 和 PMSG 同时完成 LVRT。PMSG 最少台数少于理论分析结果(70 台),原因在于 PCC 临界电压估计值误差,以及电压跌落时 IG 出力和 PCC 电压的动态变化。

## 4 结论

针对包含 PMSG 和 IG 的混合风电场,研究了利用前者富余无功容量帮助后者 LVRT 的问题。按照风电并网导则规定最严重电压跌落下,计算保证 IG LVRT 所需无功容量,确定协同 LVRT 所需的 PMSG 台数。

算法推导和仿真分析得到以下结论:

**a.** PCC 临界电压与机械转矩、IG 参数以及故障持续时间有关,IG 惯性时间常数或转子电阻越大,机械转矩或定子电抗越小,故障时间越短,临界电压越低;

**b.** 对 PCC 临界电压影响从大到小依次为 IG 机械转矩、故障时间、IG 转子电阻、IG 惯性时间常数和定子电抗;

**c.** 由于 PCC 临界电压估计值偏高,以及电压跌落时 IG 出力和 PCC 电压动态变化,使得理论分析得到的 PMSG 最少台数略高于实际所需台数,从而保留了一定裕度,有利于保证 IG LVRT。

## 参考文献:

- [1] 关宏亮,赵海翔,迟永宁,等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J]. 电网技术,2007,31(7):78-82.  
GUAN Hongliang,ZHAO Haixiang,CHI Yongning,et al. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system[J]. Power System Technology,2007,31(7):78-82.
- [2] WU Ziping,GAO Wenzhong,YANG Daye,et al. Comprehensive modeling and analysis of permanent magnet synchronous generator wind turbine system with enhanced low voltage ride through capability[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. North Carolina,USA:IEEE,2012:2091-2098.
- [3] 凌禹,蔡旭. 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):25-30.  
LING Yu,CAI Xu. Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):25-30.
- [4] MUYEEN S M,TAKAHASHI R,MURATA T,et al. Low voltage ride through capability enhancement of fixed speed wind generator[C]//IEEE Bucharest Power Tech Conference. Bucharest,Romania:IEEE,2009:1-6.
- [5] 王成福,梁军,冯江霞,等. 故障时刻风电系统无功电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):14-22.  
WANG Chengfu,LIANG Jun,FENG Jiangxia,et al. Coordinated var-voltage control during fault of wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):14-22.
- [6] GRILO A P,MOTA A D A,MOTA L T M,et al. An analytical method for analysis of large-disturbance stability of induction generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(4):1861-1869.
- [7] AMUTHA N,KUMAR B K. Effect of modeling of induction generator based wind generating systems on determining CCT [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(4):4456-4464.
- [8] 李生虎,贾豫东,李少飞,等. 定子暂态和运行区域对异步发电机稳定性影响[J]. 电工技术学报,2011,26(增刊):285-291.  
LI Shenghu,JIA Yudong,LI Shaofei,et al. Influence of stator dynamics and operation zone on stability of induction generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26 (Supplement):285-291.
- [9] 迟永宁,关宏亮,王伟胜,等. SVC 与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性[J]. 电力系统自动化,2007,31(3):95-100.  
CHI Yongning,GUAN Hongliang,WANG Weisheng,et al. Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(3):95-100.
- [10] 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,QU 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.
- [11] 张永斌,袁海文. 双馈风电机组低电压穿越主控系统控制策略 [J]. 电力自动化设备,2012,32(8):106-112.  
ZHANG Yongbin,YUAN Haiwen. Control strategy of DFIG main control system during low voltage ride through[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):106-112.
- [12] 李建林,胡书举,孔德国,等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):92-95.  
LI Jianlin,HU Shuju,KONG Deguo,et al. Studies on low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32 (19):92-95.
- [13] 胡书举,李建林,许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真[J]. 高电压技术,2008,34(5):949-954.  
HU Shuju,LI Jianlin,XU Honghua. Modeling on converters of direct-drive wind power system and its performance during voltage sags[J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):949-954.
- [14] 李生虎,许志峰. 直驱永磁同步机组卸荷电阻最优取值及分组投切策略[J]. 电网技术,2013,37(7):1868-1873.  
LI Shenghu,XU Zhifeng. Optimal value and group switching strategy of dump resistance for direct-drive permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology,2013,37 (7):1868-1873.
- [15] 张明锐,黎娜,王之馨,等. 新型永磁风电系统的低电压穿越特性研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):128-134.  
ZHANG Mingrui,LI Na,WANG Zhixin,et al. LVRT ability of PMSG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):128-134.
- [16] 李和明,董淑惠,王毅,等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报,2013,28(5):73-81.  
LI Heming,DONG Shuhui,WANG Yi,et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):73-81.
- [17] LEON A E,MAURICIO J M,EXPÓSITO A G,et al. An improved control strategy for hybrid wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2010,1(3):131-141.

- [18] TENINGE A, ROYE D, BACHA S, et al. Low voltage ride through capabilities of wind plant combining different turbine technologies[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-9.
- [19] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 331-340.
- [20] ROSYADI M, MUYEEN S M, TAKAHASHI R, et al. Stabilization of fixed speed wind generator by using variable speed PM wind generator in multi-machine power system[C]//IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems. Sapporo, Japan: IEEE, 2012: 1-6.

## 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,研究领域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,研究方向为风电机组故障穿越、风电系统动态仿真(**E-mail**: anrui135@163.

com);

许志峰(1989—),男,江西抚州人,硕士,研究方向为风电机组故障穿越、风电系统动态仿真。

## Coordinated LVRT of IG and PMSG in hybrid wind farm

LI Shenghu<sup>1</sup>, AN Rui<sup>1</sup>, XU Zhifeng<sup>2</sup>, DONG Wangchao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Maintenance Department, Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** An algorithm is proposed to figure out the minimum sets of direct-driven PMSG (Permanent-Magnet Synchronous Generator) required for the coordinated LVRT (Low-Voltage Ride-Through) of IG (Induction Generator) and PMSG. The critical slip for yielding IG instability is calculated according to the torque balance relation and the integration of the torque balance equation according to the critical slip and the fault duration is carried out to obtain the critical voltage of PCC (Point of Common Coupling) for maintaining IG stability. According to the severest voltage drop stipulated in the grid code, the required reactive power and the minimum sets of PMSG for the coordinated LVRT of IG and PMSG are derived. The dynamic simulation is performed to validate the effect of coordinated LVRT and quantify the error of theoretical derivation. It is found that, larger IG inertia time constant, larger IG rotor resistance, less IG mechanical torque, less IG stator reactance or shorter fault duration yields lower critical voltage, resulting in easier coordinated LVRT of IG and PMSG. The influence of following factors on the critical voltage is sorted from bigger to smaller: IG mechanical torque, fault duration, IG rotor resistance, IG inertia time constant, IG stator reactance.

**Key words:** wind farms; low-voltage ride-through; induction generator; direct-driven permanent-magnet synchronous generator; critical voltage

(上接第 20 页 continued from page 20)

## Integrated random scheduling for supply and demand sides of wind power system considering flexible load compensation/incentives

YANG Nan<sup>1</sup>, LIU Dichen<sup>2</sup>, DONG Kaisong<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, WEI Daqian<sup>2</sup>, ZHU Zhenshan<sup>2</sup>, YANG Yunlei<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;

2. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The increasing scale of integrated wind power brings the increasing impact on power system. An integrated random scheduling model for both supply and demand sides of wind power system is built based on the improved project tree theory, which considers the flexible load compensation/incentives and monetarily quantifies the randomness and volatility of wind power in the form of probability. According to the stochastic property of the model, the improved imperialist competitive algorithm including Romberg integration module is adopted. Simulative results show that, the proposed scheduling method improves the operational efficiency of power system with wind farm and increases the wind power integration capacity.

**Key words:** wind power; flexible load; incentives; improved project tree; integrated supply and demand sides scheduling; imperialist competitive algorithm; models; probability