

含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析

周士琼¹, 王倩¹, 吕潇¹, 郝勇奇¹, 刘东霖¹, 倪亚玲²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 电子科技大学 四川 成都 610054)

摘要: 大规模风电场并网将会影响电力系统暂态稳定性。基于直流潮流模型、扩展等面积定则并利用 Matlab/Simulink 仿真分析了不同的电压跌落、故障持续时间以及低电压穿越(LVRT)控制策略对系统暂态稳定性的影响。仿真结果表明: 电压跌落越深、故障时间越长, 系统暂态稳定性越差, 风电场的低电压穿越控制策略能够改善故障期间系统暂态稳定性, 但是其能力有限。

关键词: 风电场; 电力系统; 暂态稳定性; 低电压穿越

Abstract: The large-scale grid integration of wind farms will affect the transient stability of power system. Based on direct-current load flow model, the extended equal area criteria and Matlab/Simulink simulation, the impact of different voltage drop, fault duration and LVRT (low voltage ride through) control strategy on system transient stability is analyzed. Simulation results show that the deeper voltage drop and the longer fault time, the worse transient stability. LVRT control strategy of wind farms can improve transient stability during a fault, but its capacity is limited

Key words: wind farm; power system; transient stability; low voltage ride through

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)05-0009-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.05.003

0 引言

随着风力发电在电网的渗透率越来越高,影响着电力系统的稳定运行,因而需要研究风电系统对电网的影响^[1]。已有大量学者对风电接入电力系统暂态影响做了研究^[2-13],其中文献[10]分析不同类型的风力发电机组以及参数对电力系统暂态稳定性的影响;文献[11-12]分析风电渗透率对电力系统暂态稳定性影响。文献[13]在故障期间,利用双馈风机外特性来分析风电机组接入对系统暂态稳定性影响。但现代电网对于与其互联的风力发电机组有要求:在其发生故障导致电压跌落时,风力发电系统应该具有低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力,以防止风力发电系统因进行自我保护从而脱网。对具有低电压穿越功能的风电机组,电力系统暂态稳定性变得更加复杂。由于风电机组低电压穿越控制策略的复杂性,分析风电机组低电压穿越过程对电力系统暂态稳定性的影响刚刚起步,还较少有文献对含大规模风电场的电力系统中故障时间、系统电压跌落程度对系统暂态稳定性影响进行分析。

在文献[11]的基础上,研究故障时间、电压跌落程度对含大规模风电场的电力系统暂态稳定性的影响;根据双馈风机的等效外特性以及基于扩展等面积定则,理论分析具有LVRT的双馈风电机组的电力系统的暂态稳定性影响;最后通过建立含风电场电力系统的模型进行时域仿真来验证分析的正确性。

1 含风电场的电力系统暂态稳定机理研究

对于含风电场的电力系统,若系统在某时刻发生大扰动时,多机系统往往出现双机失稳模式。这时候多机系统就可以等值为双机系统。双机系统的结构如图1所示,系统等值电路如图2所示。

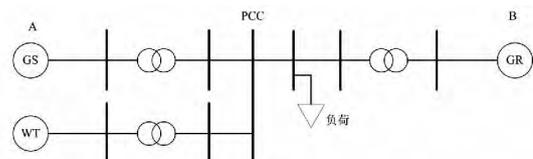


图1 含风电场双机互联系统结构图

由此,两机互联系统的运动方程为^[14]

$$\frac{M_S}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_S}{dt^2} = P_{mS} - P_{eS} = \sum_{i \in S} P_{mi} - \sum_{i \in S} P_{ei} \quad (1)$$

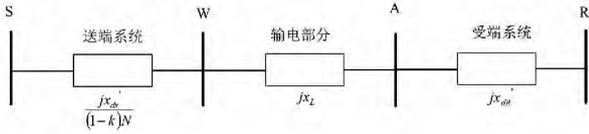


图 2 电力系统的简化等值电路

$$\frac{M_R}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_R}{dt^2} = P_{mR} - P_{eR} = \sum_{i \in R} P_{mj} - \sum_{i \in R} P_{ej} \quad (2)$$

式中: M 为同步发电机组的转动惯量; ω_0 为同步发电机的电角速度; δ 为同步发电机的功角; P_m 为同步发电机轴上机械功率; P_e 为同步发电机的电磁功率; 下标 S 和 R 分别表示两种不同的同步发电机群; P_{mS} 、 P_{eS} 为 S 同步发电机群的等值机械功率和等值电磁功率; P_{mR} 、 P_{eR} 为 R 同步发电机群的等值机械功率和等值电磁功率。

两个同步发电机群的功角差可以表示为

$$\delta = \delta_S - \delta_R \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 \left(\frac{P_{mS}}{M_S} - \frac{P_{mR}}{M_R} \right) - \omega_0 \left(\frac{P_{eS}}{M_S} - \frac{P_{eR}}{M_R} \right) \quad (4)$$

可以进一步将两机群系统等值为单机无穷大系统,在同步坐标系下,系统的运动方程为

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{M} (P_m - P_e) \quad (5)$$

式中:
$$M = \frac{M_S M_R}{M_S + M_R} \quad (6)$$

$$P_m = \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{mS} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{mR} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{eS} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{eR} \quad (8)$$

上述分析可知风电机组并入之前,两机群的功角之差为 δ ,考虑接入风机之后,两机群的功角之差变为 δ_w 。利用前后两同步机群功角差值之差来判断风机接入系统后,对原有系统稳定性的影响。令风电机组接入系统后功角的变化量为

$$\Delta \delta = \delta_w - \delta \quad (9)$$

由式(9)可以判断风电机组的接入对原有电力系统同步发电机暂态功角的影响。若功角变化量 $\Delta \delta > 0$,则说明接入风电机组的电力系统暂态稳定性变低了;反之,则可判断风电机组的接入有利于电力系统暂态稳定性的提高。

对式(9)进行二阶微分,可得方程为

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{M_w} (P_{mw} - P_{ew}) - \frac{\omega_0}{M} (P_m - P_e) \quad (10)$$

由式(10)可见,同步发电机组的机械功率与电

磁功率的变化是导致系统功角稳定性关键所在。风电机组的接入将会导致原有系统的机械功率改变,机械功率的变化量由风电机组的机械功率决定,令接入前后系统的机械功率的变化量为 $\Delta P_{m.wt}$ 。同时,也将会引起系统电磁功率的变化,令前后的变化量为 $\Delta P_{e.wt}$ 。

$$\Delta P_{m.wt} = \frac{M_{wt}}{M_S + M_R} P_{m.wt} \quad (11)$$

$$\Delta P_{e.wt} = \frac{M_R}{M_S + M_R} \frac{h P_{wt} U_S}{U_{wt}} \quad (12)$$

式中: M_{wt} 为风电机组的等值转动惯量; $P_{m.wt}$ 为风电机组的机械功率; U_S 、 U_{wt} 分别表示为 S 同步发电机群的等值内电势幅值和风电机组并网点电压幅值; h 为负荷转置系数,在已知系统结构中为实数; $\Delta P_{m.wt}$ 由风电机组的机械功率决定,运行过程中保持不变; $\Delta P_{e.wt}$ 近似与并网点电压 U_{wt} 成正比变化。

以上对含大规模风电场电力系统暂态稳定性的机理研究,都是基于转动物理方程来判断系统的暂态稳定性,然而故障时间的长短对系统暂态稳定性也有一定的影响,故要推导功角与时间的关系。

2 系统直流潮流模型及稳定性分析

由上述转子运动物理方程,可以看出系统的有功出力改变将会影响着系统暂态稳定性。风电机组的接入改变了系统原有的潮流分布,从而影响系统功角的暂态稳定。通过判断某一时段的潮流分布变化趋势,就可以对系统暂态稳定性进行判断。

文献[11]采用了直流潮流模型进行了系统暂态稳定性进行分析,只分析了三相短路故障时候的系统暂态稳定性。在实际应用中,出现电压跌落的情况常有发生;同时,故障时间、电压跌落程度对系统暂态稳定性的影响也较大。这里将在文献[11]基础上做进一步分析研究。含大规模风电场电力系统的直流潮流模型如图4所示。

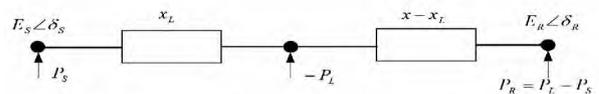


图 3 电力系统直流潮流模型

由图(3)可得,未接入风电机组前,系统稳态时两同步发电机群的功角差可表示为

$$\delta_0 = P_S x - P_L (x - x_L) \quad (13)$$

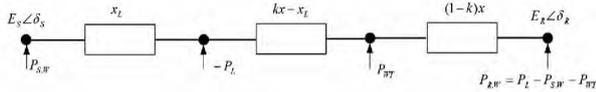


图 4 含风电场电力系统直流潮流模型

式中: x 为 S 同步发电机群的等值内电势节点到 R 同步发电机群的等值内电势节点间的电气距离; x_L 为负荷到 S 同步发电机群的等值内电势节点的电气距离。

风电机组未接入系统的等值机械功率和等值电磁功率可表示为

$$\text{令 } a_M = \frac{M_S}{M_S + M_R} \quad (14)$$

$$P_m = P_S - a_M P_L \quad (15)$$

$$P_e = \frac{\delta}{x} + \frac{x - x_L}{x} P_L - a_M P_L \quad (16)$$

由图(4)的风电接入的直流潮流模型,得出系统稳态时的两同步发电机群功角差为

$$\delta_{0w} = P_S - P_L(x - x_L) + P_{wt}(1 - k)x \quad 0 < k < 1 \quad (17)$$

因此,故障前后同步机群的功角变化量为

$$\Delta\delta_0 = \delta_{0w} - \delta_0 = P_{wt}(1 - k)x \quad (18)$$

根据直流潮流模型也可得出 S 和 R 同步发电机群的电磁功率为

$$P_{eS.w} = \frac{\delta}{x} + \frac{x - x_L}{x} P_L - (1 - k) P_{wt} \quad (19)$$

$$P_{eR.w} = P_L - P_{wt} - P_{eS.w} \quad (20)$$

由式(7)、式(8),可得出风电机组接入系统的等值机械功率和等值电磁功率为

$$\begin{aligned} P_{mw} &= \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{mS.w} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{mR.w} \\ &= P_{mS.w} - a_M (P_L - P_{wt}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} P_{ew} &= \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{eS.w} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{eR.w} \\ &= \frac{\delta}{x} + \frac{x - x_L}{x} \cdot P_L - (1 - k) P_{wt} \\ &\quad - a_M (P_L - P_{wt}) \end{aligned} \quad (22)$$

所以,故障期间等式(23)成立:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{M} [(P_{mw} - P_{ew}) - (P_m - P_e)] \\ &= \frac{\omega_0}{M} (1 - k) P_{wt} \\ &= \frac{\omega_0}{M} (\Delta P_{m.wt} - \Delta P_{e.wt}) \end{aligned} \quad (23)$$

系统故障期间,可通过式(24)、式(25)求解功角与故障时间以及风电机组注入系统的功率的关系。其初值解为

$$\Delta\delta_0 = \delta_{0w} - \delta_0 = P_{wt}(1 - k)x \quad (24)$$

$$\frac{d\Delta\delta_0}{dt} = 0 \quad (25)$$

并可求得式(23)在故障期间,微分方程的解为

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= (1 - k) P_{wt} x + \frac{\omega_0}{2M} (1 - k) P_{wt} (t - t_f)^2 \\ &= (\Delta P_{m.wt} - \Delta P_{e.wt}) [x + \frac{\omega_0}{2M} (t - t_f)^2] \end{aligned} \quad (26)$$

式中 t_f 为故障发生时间。

由式(26)得出,当故障时间一定时,系统电压跌落的程度越深 $\Delta P_{e.wt}$ 的值将越小 $\Delta\delta$ 将会变得越大,系统的暂态稳定性越差;同样,当系统发生相同的故障类型,故障时间越长,系统的暂态稳定性也越差。

3 计及 LVRT 的双馈风电机组对系统暂态稳定性影响分析

低电压穿越就是使风电机组能够在电网发生故障的时刻依旧能够并网运行。风电机组这时刻往往会通过控制有功功率、无功功率的输出来保证不脱网运行,并对电网恢复提供一定的无功能量的支撑。故障期间,电网电压的变化势必会引起系统暂态特性的变化。为此,分析故障最为严重的状况即三相接地短路故障。

根据风电机组的等效外特性^[13],故障期间单端送电系统的等值电路如图5所示。

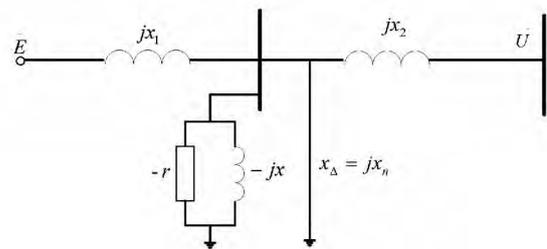


图 5 含风电场电力系统等值电路

$$\text{图 5 中: } r = \frac{u_s^2}{P_s} \quad (27)$$

$$x = \frac{u_s^2}{Q_s} \quad (28)$$

式中: u_s 为风电机组并网点电压; P_s 、 Q_s 分别为风电

机组注入到系统的有功功率和无功功率。

系统的自阻抗 Z_{11} 、互阻抗 Z_{12} 分别表示为

$$Z_{11} = jx_1 + \frac{1}{-1/r + (-1/jx) + 1/jx_n}$$

$$= \frac{-x_n^2}{\frac{x_n^2 P_s}{u_s^2} + (1 - \frac{x_n Q_s}{u_s^2})^2 \cdot \frac{u_s}{P_s}} + jx_1 + j \frac{x_n - \frac{x_n^2 Q_s}{u_s^2}}{\frac{x_n^2 P_s}{u_s^4} + (1 - \frac{x_n Q_s}{u_s^2})^2}$$

$$= |Z_{11}| \angle \varphi_{11} \quad (29)$$

$$Z_{12} = jx_1 + jx_n + \frac{jx_1 x_n}{r // -jx}$$

$$= \frac{x_1 x_n P_s}{u_s^2} + j(x_1 + x_n - \frac{x_1 x_n Q_s}{u_s^2})$$

$$= |Z_{12}| \angle \varphi_{12} \quad (30)$$

式中 φ_{11} 和 φ_{12} 分别为同步发电机的自阻抗角和互阻抗角。

1) 假定故障期间,风电场仅向系统注入无功功率

风电机组在低电压穿越过程当中往往会向电网注入一定的无功功率,假定故障期间,控制风电机组不向电网注入有功功率,最大限度地注入无功功率。则同步发电机的互阻抗将发生变化,这就使得同步发电机的输出功率 $P_e = (EU/Z_{12}) \sin\delta$ 随之发生改变。同步发电机输出的功率随着风电机组向系统注入无功功率的增大而增大。由图6可知,同步发电机的功率曲线被拉伸,系统的加速面积被减小了 S_{ebcf} ,有利于提高系统的暂态稳定性。

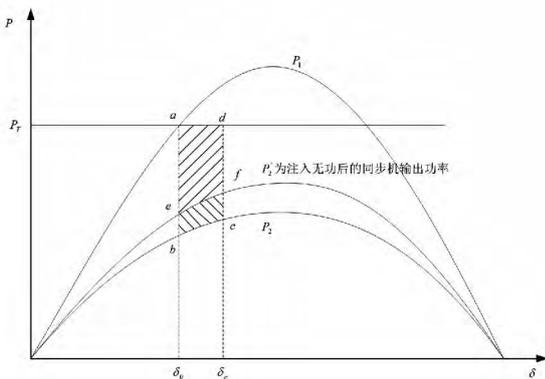


图6 计及风电场仅无功注入系统功率特性曲线

2) 假定故障期间,风电场仅向系统注入有功功率
由单机无穷大系统同步发电机输出功率表达式^[15]为

$$P_e = \frac{E^2}{|Z_{11}|} \sin(90 - \varphi_{11}) + \frac{EU}{|Z_{12}|} \sin(\delta - 90 + \varphi_{12}) \quad (31)$$

式中 δ 为同步发电机内电势与电网电压之间的角度。

故障期间,风电机组注入系统的无功功率为0,仅向系统注入有功功率。由式(29)、式(30)可得出 $\varphi_{11} > 90^\circ$ $\varphi_{12} < 90^\circ$ 。功角关系如图7所示,功率曲线向下移动的距离,右移动 ΔP 的距离为 $(90 - \varphi_{12})$,使得原有系统加速面积增加了 S_{ebcf} ,这不利于系统暂态稳定性的改善。

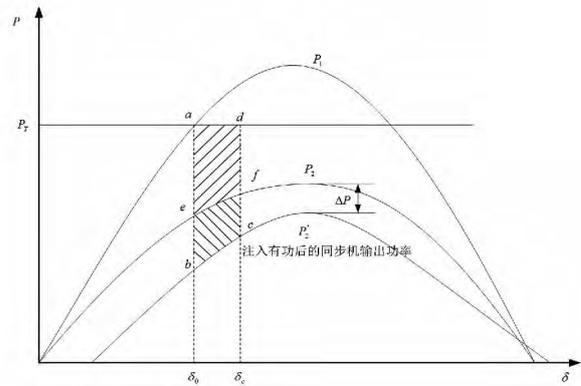
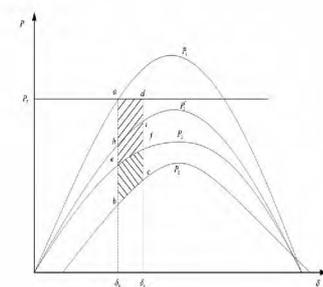


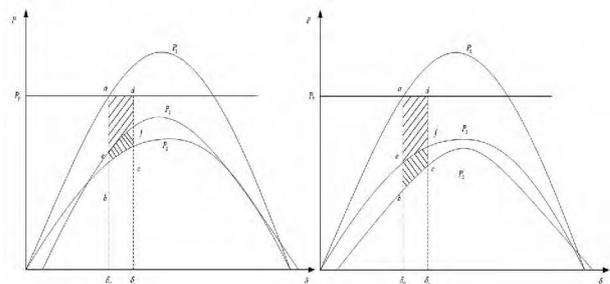
图7 计及风电场仅有功注入系统功率特性曲线

3) 假定故障期间,风电机组既向系统注入一定量的有功功率,又注入一定量的无功功率

这种情况下,系统暂态功角的变化特性比较复杂。运用图6、图7的功率曲线合成进行定性的分析,如图8(a)所示。若加速面积减速面积 $S_{ebcf} <$ 减速面积 S_{heif} ,在这种控制策略下有利于系统暂态稳定性的提高;反之,则对系统暂态功角稳定性产生不利影响,其功率曲线如图8(b)、8(c)所示。



(a) 计及风电场的系统功率特性曲线



(b) 加速面积小于减速面积的系统功率曲线
(c) 加速面积大于减速面积的系统功率曲线

图8 计及风电场同时向系统注入有功和无功的特性曲线

4 算例仿真分析

在 Matlab/Simulink 搭建文献 [13] 中的仿真模型, 风电场由 40 台额定容量为 1.5 MW 的双馈风力发电机组成, 同步发电机采用经典模型, 其额定容量为 120 MW。双馈风力发电机正常运行情况下采用恒定功率因素控制方式。不同的故障时间、故障类型以及 LVRT 控制对系统暂态稳定性影响仿真图如图 9 所示。

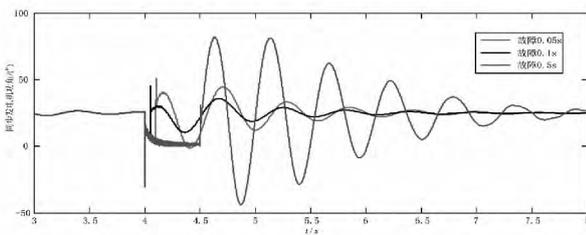


图 9 不同故障时间下系统功角曲线

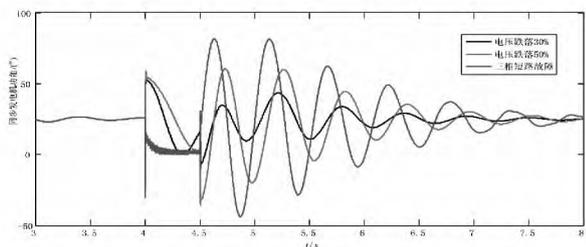


图 10 不同电压跌落下系统功角曲线

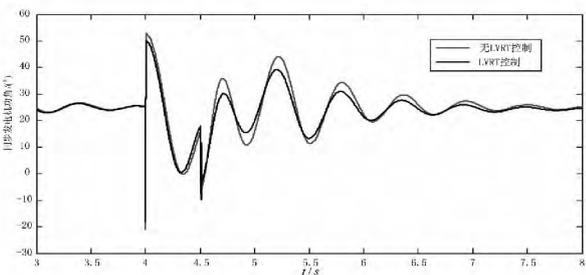


图 11 电压跌落 30% LVRT 控制下系统功角曲线

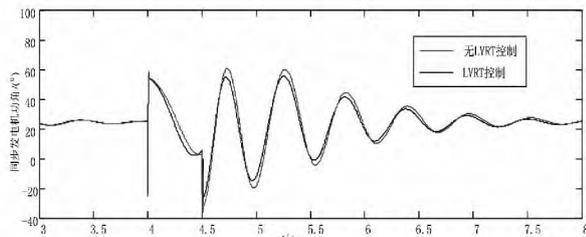
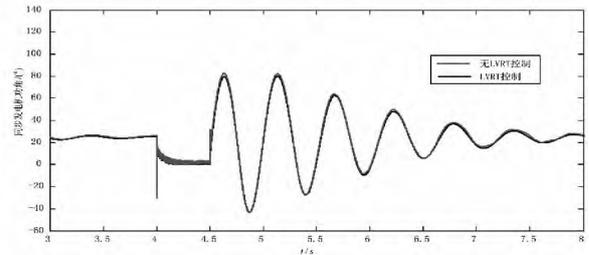


图 12 电压跌落 50% LVRT 控制下系统功角曲线

图 9 中, 系统在 4 s 时发生三相接地故障, 0.5 s 后恢复正常。不同的故障时间, 同步发电机的暂态功角发生较大的变化, 随着故障时间的延长, 同步发电机转子所积累的能量就越多, 故障恢复后, 需要释



放更多的能量, 将导致功角的变化量增大, 功角恢复稳态的时间也越长。图 10 仿真了电压跌落程度对系统暂态稳定性的影响。从仿真图中看出, 电压跌落越深, 风电场的有功输出限制越大, 风电场对系统的暂态稳定性影响越大。

图 11 ~ 图 13 仿真了不同故障情况下, 风电机组给予系统最大无功能量的补偿, 帮助系统电压的恢复, 保证风电机组不脱网运行。在此控制策略下, 风电机组对系统暂态稳定性的影响: 电压跌落 30% 时, LVRT 控制策略使得系统故障期间的功角摆动减小了 4° , 而且也减小故障恢复后系统运行到稳态的时间; 电压跌落 50%、三相短路故障时系统的功角分别减小了 1.5° 、 1° , 故障后恢复到稳态的速度也有所加快。由仿真结果可见, 随着故障程度的加深, LVRT 控制对改善系统暂态稳定性的能力是有限的。

5 结 语

运用直流潮流模型及扩展等面积定则对不同故障类型、故障时间以及 LVRT 控制策略对含大规模风电场电力系统暂态稳定性的影响进行了理论性的分析并通过仿真分析的验证。三相短路故障、较长的故障时间对系统暂态稳定性影响较大。LVRT 控制策略在一定程度上有利于系统暂态稳定, 但随着故障程度的加深, 对改善系统暂态稳定性的能力是有限的。

参考文献

- [1] 施鹏飞. 中国风电装机容量迅猛增加及存在的问题 [J]. 可再生能源, 2007, 25(3): 4-5.
- [2] Gautam D, Vittal V, Harbour T. Impact of Increased Penetration of DFIG-based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2009, 24(3): 1426-1434.

(下转第 25 页)

3)在三馈入直流系统中,通过仿真分析,得到考虑直流之间的相互影响后,多馈入短路比小于单馈入短路比。表明如果采用单馈入短路比去评价多馈入系统中交流系统的强弱,必然导致评价结果过于乐观。

参考文献

[1] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[2] Gavrilovic A. AC/DC System Strength as Indicated by Short Circuit Ratios [C]. IEEE Conference on AC and DC Power Transmission, London, 1991.

[3] R. S. Thallam. Review of the Design and Performance Features of HVDC Systems Connected to Low Circuit Ratio AC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Deliver-

y, 1992, 7(4): 2065 - 2073.

[4] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1 - 8.

[5] 洪潮, 饶红. 多馈入直流系统的量化分析指标及其应用 [J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 37 - 41.

[6] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

作者简介:

李召兄(1984), 硕士、工程师, 从事电力系统一次规划设计以及电网运行分析工作;

吴丽(1984), 工程师, 从事电力系统规划及继电保护设计工作;

苗文静(1984), 硕士、工程师, 从事超高压电网继电保护及智能变电站设备运维工作。

(收稿日期: 2016 - 04 - 28)

(上接第13页)

[3] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33 - 40.

[4] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8 - 14.

[5] 杨琦, 张建华, 李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2042 - 2047.

[6] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105 - 110.

[7] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7 - 11.

[8] 盛超, 曾杰, 郝正航, 等. 含双馈风电场电力系统暂态稳定性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 133 - 137.

[9] 陈乾, 沈沉, 刘锋. 端口能量及其在风电系统暂态稳定分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 9 - 16.

[10] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析 [J]. 电力系统及其自动化学

报, 2012, 24(2): 41 - 46.

[11] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832 - 3842.

[12] 汤奕, 赵丽莉, 郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 34 - 40.

[13] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399 - 3405.

[14] 韩祯祥. 电力系统分析(第五版) [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2013.

[15] 陈树勇, 陈会员, 唐晓俊, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 514 - 519.

作者简介:

周士琼(1991), 硕士研究生, 从事新能源发电与并网技术研究;

王倩(1962), 硕士、教授, 从事电力系统调度综合自动化研究;

吕潇(1992), 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究。

(收稿日期: 2016 - 06 - 12)