

基于改进支路暂态能量函数的风电并网暂态最优切机控制

杨濛濛¹, 郭雷², 王春华², 高培生², 黄民翔¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国家电网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 大规模风电接入比例的增加对电力系统暂态稳定性造成了影响, 因此在风电并网系统的紧急控制中必须考虑风电切机措施。首先分析了双馈式感应发电机(DFIG)的暂态运行特性; 然后运用改进支路暂态能量函数法分析了DFIG和传统火力发电机切机效果的差异性。结果表明在风电并网系统的紧急控制中应考虑风电和火电机组切机比例的配合。因此, 提出一种考虑风力发电机的最优切机决策模型和一种实用化解法, 合理选择最优的风火电切机比例, 改善系统恢复过程的特性, 极大地提高了系统运行稳定性。通过某区域风电外送系统暂态切机算例验证了该方法高效可行。

关键词: 双馈式感应发电机; 加速能量; 改进支路暂态能量函数; 电压控制; 最优切机决策; 系统稳定

Transient optimal tripping control of grid-connected wind farms based on advanced branch transient energy function

YANG Meng-meng¹, GUO Lei², WANG Chun-hua², GAO Pei-sheng², HUANG Min-xiang¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: Increasing penetration of wind farms will make an impact on the stability of power system transient process. It has resulted in the need for the wind tripping measures in the power system emergency control. Firstly, the doubly-fed induction generator (DFIG) transient operating characteristics are analyzed. Secondly, the different tripping effects between DFIG and conventional synchronous generator are analyzed by using advanced branch transient energy function. The results show that the combination of the wind power and thermal power tripping should be considered in the emergency control of the grid-connected wind farms system. Therefore, an optimal tripping decision-making model considering wind turbine and a practical method are proposed to select the optimal ratio of the thermal to wind tripping reasonably, improve the characteristics of the system recovery process, and enhance the stability of the power system. A transient tripping example of a certain regional system shows that the practical method is feasible and efficient.

Key words: doubly-fed induction generator; accelerating energy; advanced branch transient energy function; voltage control; optimal tripping decision-making; system stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0072-06

0 引言

中国风电基地主要集中在三北地区, 这些风电基地大多位置较偏, 受电力负荷小等因素限制, 风电消纳能力有限, 大规模风电必须通过外送至其他区域电网消纳。近年来, 随着大规模风电基地接入比例增加, 带来经济效益的同时, 也对电力系统的暂态安全稳定造成了影响, 使电力系统在严重故障下的紧急控制必须考虑风电机组的影响, 制定相应的紧急控制方案^[1-3]。提高暂态稳定性的紧急控制措施有很多, 如切机、切负荷、提高系统输送能力等, 其中切机切负荷控制快捷有效, 因此, 通常采用切机切负荷控制措施。目前, 对紧急控制下火电

机组切机控制措施的研究有很多, 如时域仿真法^[4]、扩展等面积法^[5]、暂态能量函数^[6]等, 但在风电和火电机组切机影响和切机决策方面的研究较少。

文献[7-9]指出大规模风电并网对电网的暂态稳定性及切机效果均产生了不可避免的影响。文献[10]提出了计算火电机组切机量的方案, 但未考虑火电机组和风电机组切机对暂态系统影响的差异性。

本文提出了基于改进支路暂态能量函数的考虑风力发电机的最优切机模型和一种实用化解法, 实现从能量角度对火电机组和风电机组的解耦。系统发生严重故障后, 须合理选择最优的火电机组和风电机组切机比例, 在保证系统恢复稳定的前提下,

改善系统恢复过程的特性, 提高系统运行的安全性和稳定性。

1 DFIG 的运行特性

双馈式感应发电机(DFIG)是在同步发电机和非同步发电机的基础上发展起来的新型发电机, 属于交流励磁发电机, 具有广泛的稳定运行范围, 与传统同步发电机相比, 在任一滑差运行点上具有相同的功角方程^[11], 传统同步发电机功角特性曲线如图 1 所示。

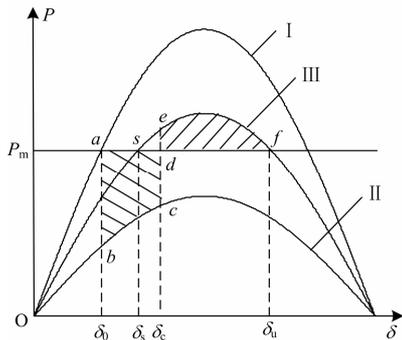


图 1 传统同步发电机的功角特性曲线

Fig. 1 Conventional synchronous generator power angle characteristic curves

由图 1 可以看出, 传统同步发电机正常运行在 a 点, 发生短路故障瞬间跳到 b 点, 当运行到 c 点时切除故障, 运行点跳到 e 点。根据等面积法则, 当 $abcd$ 加速面积大于 def 减速面积时, 发电机将越过 f 点失步。

文献[11]指出当电网发生故障后, 输入的机械功率大于系统的有功功率, DFIG 开始加速运行, 由于 DFIG 属于交流励磁发电机, 具有“有功功率暂态频率特性”, 故 DFIG 转子的转速增加时, 输入到发电机的机械功率降低。如图 2 所示的功角特性曲线, 根据扩展等面积法则, 此时相当于减小了加速面积, 增大了减速面积。

因此, 对于大规模风电并网系统, 发生故障后,

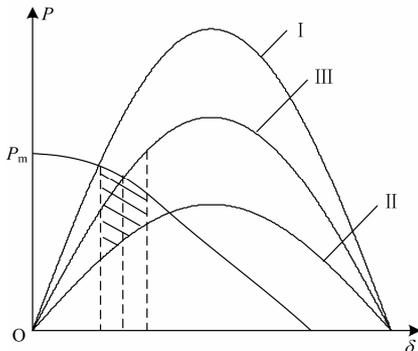


图 2 功角特性曲线

Fig. 2 Power angle characteristic curves

可以认为 DFIG 几乎不提供加速能量, 系统暂态过程中的加速能量全部来自火电机组。

2 基于改进支路暂态能量函数的切机分析

2.1 改进支路暂态能量函数

电力系统是一个能量系统, 系统失稳过程中的各种变化都可以从能量角度进行分析。因此, 可通过构造暂态能量函数对电力系统受扰动后的暂态过程进行分析。多机系统在惯性中心(COI)坐标定义下的支路暂态能量函数可分解为系统的总动能与总势能之和^[12]。由于系统稳定性决定于发电机是否同步, 因此可以不计负荷的影响。为简化系统稳定性研究, 定义改进支路暂态能量函数, 此时可不考虑支路与电阻相关的能量以及负荷的能量。

此时, 系统总动能可描述为

$$V_k = \sum_{b=1}^l V_{kb} = \frac{1}{2} \sum_{b=1}^l \omega_N M_b \omega_{ij}^2 \quad (1)$$

式中: l 表示支路数; ω_N 表示额定角频率; M_b 表示发电机的惯性时间常数; ω_{ij} 为第 b 条支路两端的角频率差。

取系统受扰动后稳定平衡时刻 t_s 为暂态势能的参考点, 系统总势能可描述为

$$V_p = \sum_{b=1}^l V_{pb} = \sum_{b=1}^l \omega_N \int_{t_s}^t [P_{b\text{out}}(t) - P_{b\text{out}}^s] \omega_{ij} dt \quad (2)$$

式中: $P_{b\text{out}}(t)$ 表示第 b 条支路流出功率; $P_{b\text{out}}^s$ 表示第 b 条支路故障前功率。

系统的总能量为

$$V = V_k + V_p \quad (3)$$

设风电外送系统中有 n 台发电机, 其中 x 台为 DFIG 风机, 其余为传统同步发电机。由于 DFIG 在暂态过程中几乎不产生加速能量, 因此故障切除时刻系统增加的动能为

$$\Delta V_k = \sum_{b=1}^{n-x} V_{kb} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_N M_i (\omega_{ci}^2 - \omega_{0i}^2) \quad (4)$$

故障切除时刻增加的势能为

$$\Delta V_p = \sum_{b=1}^{n-x} V_{pb} = \sum_{b=1}^{n-x} \omega_N \int_{t_s}^{t_c} [P_{b\text{out}}(t) - P_{b\text{out}}^s] \omega_{ij} dt \quad (5)$$

$$\Delta V = \Delta V_k + \Delta V_p \quad (6)$$

系统功角稳定的最大能量限制为

$$\Delta V_{\max} = \sum_{b=1}^{n-x} \omega_N \int_{t_s}^{t_u} [P_{b\text{out}}(t) - P_{b\text{out}}^s] \omega_{ij} dt \quad (7)$$

式中: t_s 、 t_u 分别为故障后稳定平衡点和不稳定平衡点处的时刻; t_c 为故障切除时刻。

当系统发生故障或受到扰动后, 若 $\Delta V > \Delta V_{\max}$, 则系统功角失稳, 说明暂态能量大于最大能量限制, 此时可以采取切机的紧急控制措施平衡掉这部分能

量, 使系统保持稳定。

由式(4)~式(7)可知, 当系统发生严重故障需采取紧急控制时, 由于 DFIG 在暂态过程中几乎不产生加速能量, 而火电机组会提供很大的加速能量, 因此切除 DFIG 在消除加速能量方面作用不大, 为保证系统恢复稳定, 必须切除部分火电机组, 以减小加速能量。为加快暂态能量消除, 在切机分配时, 应根据故障后系统中火电机组的转速偏差 $\Delta\omega$ 进行排序, 优先考虑切除 $\Delta\omega$ 较大的机组。

2.2 风电穿透率对切机控制的影响

本文采用经典 3 机 9 节点模型仿真系统说明风电穿透率对切机控制的影响。将 DFIG 模型通过升压变 T4 添加到母线 Bus 9 上, 为简化仿真模型, 其中直接将 0.69 kV 升压至 220 kV, 即变压器变比是 0.69 : 220。DFIG 的额定有功功率和有功功率输出参数均与传统发电机 G3 的设置相同。传统同步发电机为 G1、G2、G3, 仿真软件为 DIgSILENT/PowerFactory^[13], 仿真系统模型图如图 3 所示^[14]。

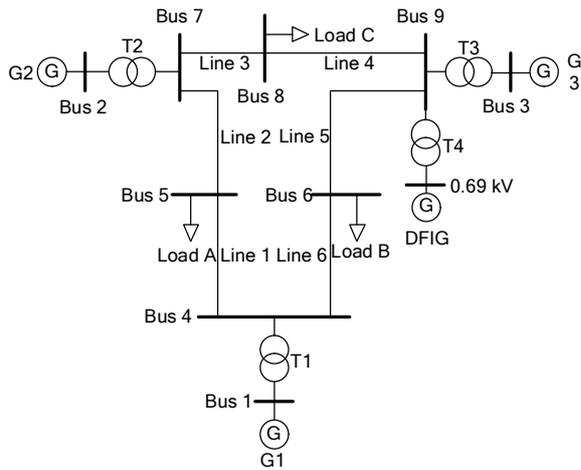


图 3 3 机 9 节点模型仿真系统图

Fig. 3 Simulation system diagram of the 3 generators and 9 buses model

对图 3 所示的 3 机 9 节点仿真系统进行切机后 0~5 s 暂态过程仿真, 假设 0.02 s 时母线 Bus 8 出现三相短路故障, 0.1 s 时连接到 Bus 8 两端的线路 Line 3 和 Line 4 断路器跳闸, 故障清除。0.22 s 时, 分别模拟切除传统同步发电机 G3 和切除 DFIG 两种情况下的暂态过程, 仿真结果如图 4 所示。

切除 DFIG 机组 5 s 后暂态过程趋于稳定; 而切除传统同步机组 5 s 后, 系统恢复过程中振荡非常明显。这是由于切机后两种情况下剩余电网风电穿透率的不同, 切除传统同步机组后剩余电网的风电穿透率较大。文献[15]中指出当系统的风电穿透率大于一定比例后, 随着风电穿透率的增加, 系统阻尼比呈迅速下降的趋势。由于切除传统同步机与切

除 DFIG 机组相比, 剩余电网的风电穿透率较大, 导致这种情况下系统阻尼比较小, 系统恢复过程振荡明显。

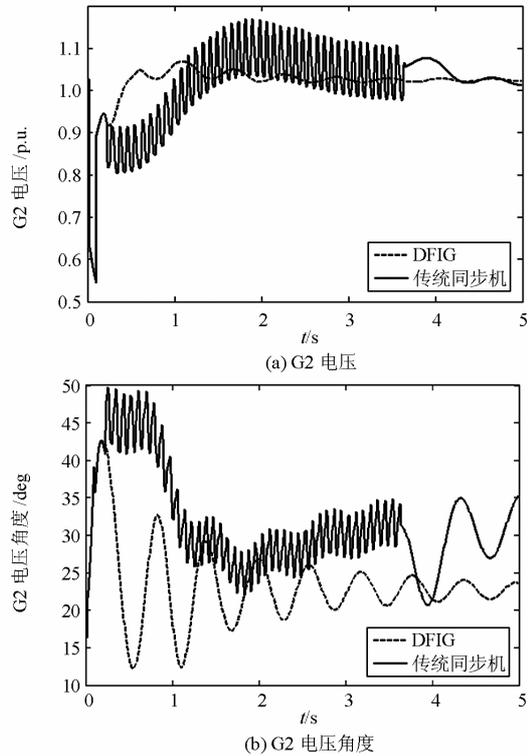


图 4 切除 DFIG 和传统同步机后的暂态过程比较
Fig. 4 Transient process comparison after DFIG and conventional synchronous generator tripping

因此, 在大规模风电接入系统的暂态切机控制中, 若只切除火电机组, 会造成剩余电网的风电穿透率过大, 系统阻尼比过低, 将对系统恢复稳定过程的特性产生不利影响。故暂态切机控制中应在保证系统恢复稳定的前提下, 适当切除部分风电机组, 以减小剩余电网的风电穿透率, 维持系统阻尼比, 改善系统恢复过程的特性。

2.3 考虑风力发电机的最优切机决策

从前文可以看出, 消除暂态能量不足以及风电穿透率过大均会对系统恢复稳定过程的特性产生不利影响, 因此对于风电并网系统发生严重故障后的紧急控制, 须考虑风电和火电机组切机比例的配合, 在保证系统恢复稳定的前提下, 改善系统恢复过程的特性, 以提高系统运行的安全性和稳定性。

因此, 提出一种考虑风力发电机的最优切机决策, 以切机后母线电压波动最大值与系统恢复后稳定电压的差值 ΔU_{\max} 最小为目标函数, 改善系统恢复过程的特性, 通常选择离故障点较近且不与主网相连的母线; 以 2.1 节中提到的暂态能量 $\Delta V \leq \Delta V_{\max}$ 为暂态稳定约束, 保证故障后的切机控制能使系统

恢复稳定; 以所需总切机量等于火电切机量与风电切机量的和为切机控制约束; 以线路潮流限制、母线电压限制等为静态安全约束。考虑风力发电机的最优切机决策问题可描述为如下数学模型。

$$\text{obj. } \min_{P_h, P_f} \Delta U_{\max}$$

s.t.

1) 暂态稳定约束: $\Delta V \leq \Delta V_{\max}$

2) 切机控制约束: $P_h + P_f = P_z$

3) 静态安全约束: $\underline{u} \leq u \leq \bar{u}$

$$|P_b| \leq P_b^{\max}$$

式中: P_z 表示暂态稳定约束下所需总切机量, 等于稳态时输电断面传输功率和故障清除后剩余联络线最大传输能力^[3]的差值; P_h 和 P_f 分别表示火电切机量和风电切机量; \underline{u} 和 \bar{u} 分别为母线电压的下限和上限; P_b 为线路潮流; P_b^{\max} 为线路潮流约束。

由于以上数学模型较为复杂且存在暂态过程, 因此计算过程复杂, 计算量过大。故提出一种实用的考虑风力发电机的最优切机决策计算流程, 其步骤如下。

1) 输入参数 ΔP 和 P_z , 初始化 ΔU_e , $Flag$ 。其中, ΔP 表示调整切机方案时每次减小的火电切机量, 相当于步长。

2) 判断区域内火电机组可切除量是否大于 P_z 。若是则按 $\Delta\omega$ 排序切除功率 P_z 的火电机组; 若不是则切除所有火电机组, 并切除部分风机。

3) 按步骤 2) 制定初始切机方案并进行暂态过程计算。

4) 判断系统是否稳定。若不稳定, 则按 ΔP 减小火电切机量, 同时按 ΔP 增加风电切机量, 制定新的切机方案并进行暂态过程计算, 重复步骤 4); 若系统稳定, 则转到步骤 5)。

5) 记录该切机方案下的 ΔU_{\max} , 判断 ΔU_{\max} 是否大于 ΔU_e 。若不是, 则令 $\Delta U_e = \Delta U_{\max}$, 并记录当前切机方案为最优切机方案, 然后按 ΔP 增加风电切机量, 制定新的切机方案并进行暂态过程计算, 重复步骤 5); 若是, 则输出最优切机方案。

考虑风力发电机的最优切机决策计算流程图如图 5 所示。

3 算例分析

3.1 测试系统

本文选取某区域风电基地外送系统作为暂态切机控制的研究对象, 图 6 为系统接线图。大规模风电厂和火电厂通过 220 kV 变电站并网, 然后升压至 500 kV 分别接入 500 kV TS 变和 500 kV SY 变。该风电基地输出功率主要通过 TS 变和 SY 变之间的双回 500 kV 线路送入 SY 变, 再通过 SY 变和主网之间连

接的双回 500 kV 线路送入主网。仿真工具为 PSASP。

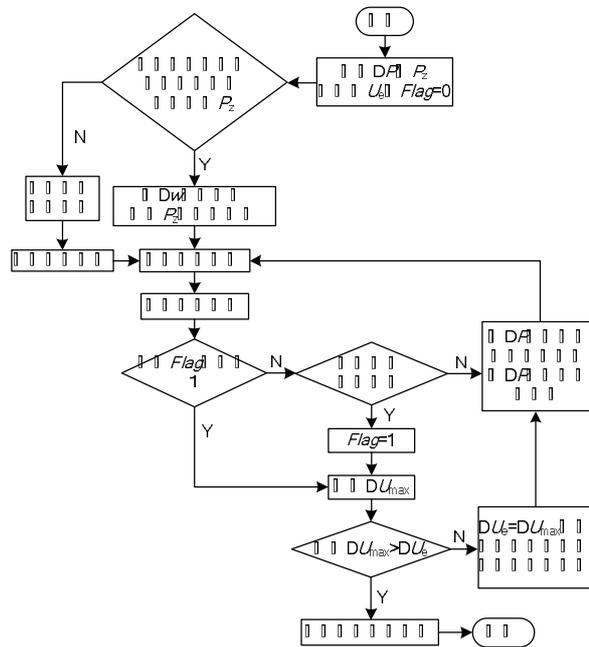


图 5 考虑风力发电机的最优切机决策流程
Fig. 5 The optimal tripping decision-making process with wind turbine considered

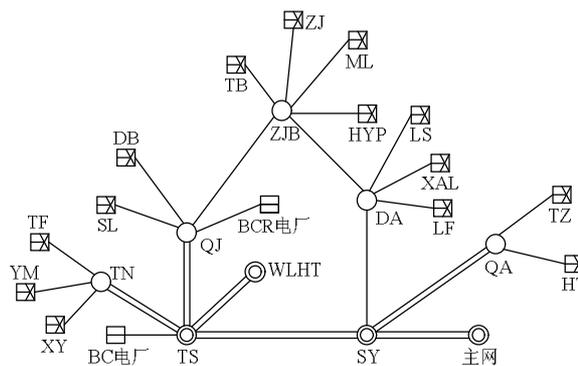


图 6 某风电基地外送接线路
Fig. 6 Wiring diagram of a wind power base transmission system

3.2 不同切机方案效果比较

故障前 TS 变向 SY 变送出有功功率为 1 691.8 MW。假设 1 s 时在连接 TS 变与 SY 变的一回线之间发生三相短路故障。在 1.1 s 时, 连接 TS 变与 SY 变的两回线都跳闸, 同时切除一些双馈机和火电机组。下面对四种不同切机方案效果比较进行研究。为了更好地比较, 四种切机方案的切机总量设置相似, 不同之处在于双馈风机和火电机组的切机比例。 P_z 、 P_h 和 P_f 分别表示总切机量、火电切机量和风电切机量。其中火电切机优先切除转速偏差 $\Delta\omega$ 较大的机组。 ΔU_{\max} 为切机后母线电压波动最大值与系统恢复后稳定电压的差值, 本算例选取 TS 变 500 kV 母

线电压。不同切机方案的切机效果对比如表 1 所示。

表 1 不同切机方案的切机效果对比
Table 1 Comparative tripping effects of different tripping schemes

| 编号 | 切机方案 | 切机效果 |
|----|---------------------------|--|
| 1 | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | 系统稳定 TS 变 $\Delta U_{\max}=14.575\ \text{kV}$ |
| | $P_h=730\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=648.5\ \text{MW}$ | |
| 2 | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | 系统稳定 TS 变 $\Delta U_{\max}=9.765\ \text{kV}$ |
| | $P_h=690\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=688.5\ \text{MW}$ | |
| 3 | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | 系统稳定 TS 变 $\Delta U_{\max}=18.265\ \text{kV}$ |
| | $P_h=550\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=828.5\ \text{MW}$ | |
| 4 | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | 系统不稳定 |
| | $P_h=0\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=1378.5\ \text{MW}$ | |

从方案 1 到方案 4 的暂态过程仿真结果可以看出, 风火机组的切机比例不同对结果影响很大。

1) 方案 4 只切除了风电机组, 共计 1 378.5 MW, 5 s 后系统不稳定, 说明只切除风电机组时消除暂态能量的能力不足, 系统无法恢复稳定。

2) 从方案 1 到方案 3 的切机效果可以看出, 在三种方案的总切机量相同并且系统均恢复稳定的情况下, 系统的恢复特性不同, 其中方案 2 的 TS 变 ΔU_{\max} 远小于方案 1 和方案 3。方案 1 到方案 3, 随着火电机组切机量的减小, TS 变 ΔU_{\max} 先变小后变大, 说明随着火电机组切机比例的降低, 系统的恢复特性先变好后变差, 因此本算例的暂态切机控制存在最优切机方案。

3.3 最优切机方案决策

从前文可知, 消除暂态能量不足以及风电穿透率过大均会对系统恢复稳定过程的特性产生不利影响, 因此合理选择风火电机组切机比例, 有利于改善系统的恢复特性, 即本算例中应在保证系统恢复稳定的前提下使 TS 变 ΔU_{\max} 最小。

按图 5 所示流程图进行暂态最优切机决策, 输入 $\Delta P=5\ \text{MW}$, 根据文献[3]计算 $P_z=1378.5\ \text{MW}$, 本算例中 ΔU_{\max} 为切机后 TS 变电压波动最大值与系统恢复后稳定电压的差值, 初始化 $\Delta U_e=9999$, $Flag=0$ 。最优切机决策的部分仿真结果如表 2 所示。

从表 2 的仿真结果可以看出, 本算例中方案 III 的 TS 变 ΔU_{\max} 最小, 即系统恢复过程中电压波动特性最好, 因此, 方案 III 为本算例的暂态最优切机方案。说明本文提出的最优切机决策具有良好的实用性。

4 结论

1) 对于大规模风电并网系统, 发生故障后,

表 2 风火电不同切机比例的最优切机决策
Table 2 The optimal tripping decision-making for different proportion of wind and thermal power

| 编号 | 切机方案 | 切机效果 |
|-----|---------------------------|---|
| I | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | TS 变 $\Delta U_{\max}=10.11\ \text{kV}$ |
| | $P_h=695\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=683.5\ \text{MW}$ | |
| II | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | TS 变 $\Delta U_{\max}=9.765\ \text{kV}$ |
| | $P_h=690\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=688.5\ \text{MW}$ | |
| III | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | TS 变 $\Delta U_{\max}=9.445\ \text{kV}$ |
| | $P_h=685\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=693.5\ \text{MW}$ | |
| IV | $P_z=1\ 378.5\ \text{MW}$ | TS 变 $\Delta U_{\max}=9.785\ \text{kV}$ |
| | $P_h=680\ \text{MW}$ | |
| | $P_f=698.5\ \text{MW}$ | |

可以认为 DFIG 几乎不提供加速能量, 系统暂态过程中的加速能量全部来自火电机组。

2) 传统同步发电机和 DFIG 的切机效果存在差异。风电并网系统发生严重故障后, 根据改进支路暂态能量函数, 为加速能量的消除必须切除部分火电机组, 同时为减小剩余系统的风电穿透率以维持足够的阻尼比, 应适当切除部分风电机组。因此, 提出了考虑风力发电机的最优切机决策模型和一种实用化解法, 在保障严重故障后系统恢复稳定运行的基础上, 合理选择最优的火电机组和风电机组切机比例, 改善系统恢复过程的特性, 极大地提高了系统运行的安全性, 具有良好的实用性。

3) 本文中采用的是具有实用性的流程图解决考虑风力发电机的最优切机决策问题, 下一步将着重研究严格意义上的最优切机决策数学模型解法。

参考文献

- [1] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
WANG Yong, ZHANG Chun-jiang, CHAI Xiu-hui, et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 14-19.
- [2] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [3] 蔚兰, 陈国呈, 宋小亮, 等. 一种双馈感应风力发电机

- 低电压穿越的控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 170-175.
- WEI Lan, CHEN Guo-cheng, SONG Xiao-liang, et al. A low voltage ride-through of strategy for doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 170-175.
- [4] 孙景强, 房大中. 暂态稳定约束下极限传输能力的计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 21-25.
- SUN Jing-qiang, FANG Da-zhong. Total transfer capacity with transient stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 21-25.
- [5] 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.
- LIN Li, YANG Yi-han. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 105-110.
- [6] 任伟. 基于暂态能量的电力系统暂态稳定切机控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [7] 李辉, 赵斌, 史旭阳, 等. 含不同风电机组的风电场暂态运行特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 1-7.
- LI Hui, ZHAO Bin, SHI Xu-yang, et al. Simulation study on the transient operational performances of a wind farm including different wind turbine generator systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 1-7.
- [8] 田春箐, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.
- TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-51.
- [9] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.
- HE Shi-en, DONG Xin-zhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.
- [10] 陈树勇, 陈会员, 唐晓骏, 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.
- CHEN Shu-yong, CHEN Hui-yuan, TANG Xiao-jun, et al. Generator tripping control to upload transient stability of power grid outwards transmitting thermal-generated power bundled with wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 514-519.
- [11] 颜湘武, 王仁洲, 柳焯. 采用交流励磁控制发电机提高系统的暂态稳定性[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 35-38.
- YAN Xiang-wu, WANG Ren-zhou, LIU Zhuo. To improve system transient stability by AC excitation control generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 35-38.
- [12] 云雷, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于支路暂态能量函数的特高压区域电网间容量交换能力研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 7-12.
- YUN Lei, LIU Di-chen, LIAO Qing-fen, et al. Power exchange capacity among UHV power grids based on branch transient energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 7-12.
- [13] 李琦芬, 张建平, 丁权飞, 等. 基于 PSASP 与 DiGSiLENT /PowerFactory 软件的风电机组建模与仿真研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 296-300.
- LI Qi-fen, ZHANG Jian-ping, DING Quan-fei, et al. Wind turbine modeling and simulation based on PSASP and DiGSiLENT/PowerFactory software[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 296-300.
- [14] 丁剑, 邱跃丰, 孙华东, 等. 大规模风电接入下风电机组切机措施研究(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 25-36.
- DING Jian, QIU Yue-feng, SUN Hua-dong, et al. Consideration of wind generator tripping under large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 25-36.
- [15] 陈树勇, 常晓鹏, 孙华东, 等. 风电场接入对电力系统阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1570-1577.
- CHEN Shu-yong, CHANG Xiao-peng, SUN Hua-dong, et al. Impact of grid-connected wind farm on damping performance of power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1570-1577.

收稿日期: 2013-12-18; 修回日期: 2014-01-01

作者简介:

杨濛濛(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划, 风电并网稳定控制。E-mail: ymm0221@163.com