

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200634

安稳系统中风电脱网风险在线评价指标

李祖明¹, 张星宇², 陈松林², 任祖怡², 夏尚学², 王君超²

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 近年来, 我国绿色新能源产业迅猛发展, 清洁高效的风电产业并网增加, 但风电机组大规模脱网的事件仍有偶发, 对新能源的管理水平和安全控制提出了新的挑战和要求。针对稳控切机策略与风电场脱网配合难以协调和脱网指标难以评判的问题, 提出了一种在线评判风电场脱网风险的有效方法。基于各机组电气量以及保护动作信息构建动态脱网危险因子, 并将整个风电作为整体, 评估风电场低电压穿越模式下的脱网风险, 为新能源机组精益控制和安全稳定控制系统的切机优化策略建立理论依据。最后通过仿真分析验证了所提出的脱网危险评判标准的可行性及有效性。

关键词: 风电场; 脱网风险; 在线; 评价指标; 切机策略

On-line evaluation method of wind farm off-grid risk in power system stability control

LI Zuming¹, ZHANG Xingyu², CHEN Songlin², REN Zuyi², XIA Shangxue², WANG Junchao²

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Green new energy is developing rapidly, with increasing integration in a clean and efficient wind power industry. However, large-scale off-grid events of wind turbines have occurred from time to time, posing new challenges to the level of control of new energy sources. A method is proposed for an online evaluation criterion for off-grid risk to deal with the difficulty of coordinating the steady-state cut-off strategy with wind power off-grid and the difficulty in judging the off-grid index. Based on the electrical quantity and protection action information of each unit, the risk of an off-network under low-voltage-ride-through mode of wind farm is evaluated taking the wind farm as a whole. The method realizes panoramic monitoring and evaluation of the wind farm fault process, laying the foundation for precise control and cut-off execution. Finally, the effectiveness of the proposed de-networking risk assessment criteria is verified by simulation.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51507077).

Key words: wind farm; off-grid risk factor; on-line; evaluation criteria; cut-off strategy

0 引言

当风电场产生故障时, 大多数安全稳定控制系统会根据设置好的优先级轮次或根据功率级别^[1-3]依次切断新能源机组, 但并未将新能源电站故障期间风电机组脱网的风险纳入考虑范围内。假设故障时, 新能源执行站根据现有的常规模式, 执行控制主站下达的切机命令, 则可能在切除预先设定的机组的同时, 仍有其他机组脱网, 导致切除量变大, 系统功率缺额加重, 背离稳定控制系统精益控制的发展方向。因此, 将风电场脱网风险的评估指标纳

入切机逻辑范围的方案已是当务之急。

国内外许多专家学者对于风电场脱网机理及风险度评估^[4-7]和治理^[8-9]进行了大量的研究。研究表明, 不同时期的电压状态及过程都可能导致风电机组脱网。例如故障发生期间的低电压过程, 故障恢复期间的高电压过程^[10-11], 甚至是故障初始阶段的瞬态电压过程^[12-13]。此外, 故障前设备的运行方式以及故障期间的低压穿越方式可能会进一步加剧脱网事故的严重程度^[14-17]。

目前现有关于风电脱网风险的评估算法大多都基于预先构建事故预想集的方式, 即通过建立一个影响风电脱网时间的不确定概率模型, 人为预设有效故障事件, 并离线计算脱网风险^[4-6]。这不可避免

基金项目: 国家自然科学基金青年项目资助(51507077)

地会产生计算量爆炸、事故预想及分析不完备、机组模型构建不精确等诸多问题。文献[7]为了提高计算速度, 根据脱网概率生成的指标及风电场到故障点的电气距离远近对事故预想集进行排序分类, 并进一步筛选和生成有效事故预想子集。文献[18-19]将决策树算法或者区间分析层次结构概念引入脱网风险计算, 增加层次结构, 优化了对脱网风险评估指标的数学模型。然而现有方案只是对构建事故预想集模型的一种结构优化, 并没有从根本上找到一种能解决该方法本质问题的方案^[20]。文献[21-22]提出在线评估脱网风险指标, 纳入偶发可能性及严重程度, 评估风力出力时间级不确定性^[23-24]对电压稳定性的影响, 但其在采样间隔内对矩阵进行迭代计算, 牺牲部分精度, 难适用于安全稳定控制的高要求系统。

本文着眼于采集高低电压穿越方式下有关风电机组的信息, 在线综合评估单台风机和整个风电场风电机组的脱网风险, 优化了风电场脱网风险的在线评估指标。优化安全稳定控制系统主站对切机风电场的选择决策并为各风电场执行精细化切机动作提供可靠依据。

1 风电机组脱网时动作模型

尽管引起风电场连锁脱网故障的机理不尽相同, 本体保护动作是导致单台风机组脱网的必然原因, 由此对导致机组脱网的保护动作特性的研究十分关键, 以寻求一种优良的风电场脱网风险评估指标, 用于安全稳定控制系统。

1.1 风电机组本体保护典型配置

风电机组的控制系统通过控制其出口断路器进行本体保护。一般情况下, 风电机组配备有电压越限保护、直流侧过电压越限保护、过电流保护、三相不平衡保护以及频率越限保护等多种保护措施以最大限度避免故障损坏风电机组设备。

1) 定子机端电压保护

依照低电压穿越要求^[25], 如果电网出现故障, 风电机组需要具备连续运行一段时间且不发生脱网现象的能力。低电压保护判据可以表示为

$$\begin{cases} U \leq 0.2U_n, & 0 \leq t \leq 0.625 \text{ s} \\ U < (0.509t - 0.118)U_n & 0.625 \text{ s} < t \leq 2 \text{ s} \\ U \leq 0.9U_n & t > 2 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

2) 过流保护

机组过流保护分别包含定子侧过流保护, 转子侧过流保护和网侧过流保护。其跳闸判据则可以表示为

$$\begin{cases} I \geq I_{\text{set}}^I & \& t \geq t_{\text{set}}^I \\ I \geq I_{\text{set}}^{\text{II}} & \& t \geq f(I) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 为电流; I_{set}^I 为过流 I 段定值; t_{set}^I 为过流 I 段延时; $I_{\text{set}}^{\text{II}}$ 为反时限过流定值; $f(I)$ 则为反时限动作曲线。

3) 直流侧电压越限保护

通常风电机组会装设电压越限保护, 目的是保护电力电子不受到故障时背靠背逆变器间不平衡电流的损坏, 其跳闸判据可以表示为

$$U_{\text{dc}} \geq U_{\text{dc.set}} \quad \& t \geq t_{\text{dc.set}} \quad (3)$$

式中: U_{dc} 表示直流端电压; $U_{\text{dc.set}}$ 表示过电压定值; $t_{\text{dc.set}}$ 表示延时时间。

除了上文列出的几种可能引起风电机组脱网的常见因素外, 超温、电压不平衡、超速以及谐波越限等保护配置都可能导致机组脱网的风险发生。

1.2 本体保护动作模型

为风电机组配置的本体保护种类繁多, 且厂家之间设置的定值也不尽相同, 导致对每种具体型号的风电机组进行详细的策略分析有较大难度。然而, 综合总结之前列举的多种保护配置, 可以从电气量特征方面将风电机组的本体保护模型分成两大类。

第一类: 电气量保护是持续稳定的, 比如过流、低电压保护。故障产生期间, 保护所需的电气量不会出现较大范围的波动, 电气量比较稳定。按照跳闸判据又可进一步分为欠量保护和过量保护两小类, 欠量保护的判据表达式为

$$\begin{cases} x \leq x_{\text{set}} \\ t \geq t_{\text{set}} = f(x) \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 表示动作量; x_{set} 表示整定值; t_{set} 表示动作延时, 其有可能是与动作量有关的函数。

过量保护的判据表达式为

$$\begin{cases} x \geq x_{\text{set}} \\ t \geq t_{\text{set}} = f(x) \end{cases} \quad (5)$$

第二类: 波动性的越限保护。对于一些保护, 故障期间保护动作量可能出现大范围的波动以至于反复穿越定值。例如直流侧过电压保护^[26], 在不平衡故障发生后, 逆变器中的负序分量则可能会在直流侧感应出很大的倍频分量, 致使直流侧电压以保护定值为中心波动。虽然波动性的越限保护的跳闸判据和第一类保护相同, 但是其动作量越限的持续时长是更需要被着重关注的动作特性。

一般而言, 保护动作的两个必要条件为: 1) 动作量达到整定值且不返回; 2) 持续动作达到延时

定值。因此，需要将这两个必要条件都纳入对机组脱网风险在线评判的考虑范围内。

风电机组脱网的必然原因是本体保护的动作用量达到定值，同时各类保护原理的跳闸判据也不超出上文提到的两类。当前，安全稳定控制系统的动作时间通常在故障切除后的 0~60 s 内^[27-28]，而风电机组本体保护的动作用量通常在 0.1~15 s 以内。基于通信系统的高速性能，安全稳定控制系统便可在故障发生期间利用风电机组各类保护的动作用量为判断出风电场脱网风险大小的可能。

本文提出了一种风电场脱网风险的在线评判方法：故障发生后，直接根据实时收集测量到的保护动作信息在线评判出风电机组脱网的风险程度，省去事先构建事故预想集的需要。

2 风电场脱网风险的定量表示

2.1 单台机组脱网危险因子的表示

首先，用 λ 定义单台风电机组的脱网风险因子，其表示的是，在未来一段时间内，某风电机组脱网的风险大小，取值范围在 [0, 1] 之间， λ 越接近 0 代表该风机脱网风险越小。

在故障发生时以及故障恢复期间，需要评估的是由于保护启动而导致的风机脱网概率。定值裕度和时间裕度都将影响单台机组脱网危险的大小，定值裕度指的是保护动作用量与定值之间的差值，时间裕度指的是保护达到整定值，当前时间与延时定值之间的差值。根据上节分析中三类跳闸判据的脱网风险因子的构造，其原理显然不可一概而论，因而有必要分类进行构造。下面将一一进行详细介绍。

1) 针对第一类跳闸判据的脱网风险因子的表示

第一类跳闸判据代表的是持续且稳定的电气量保护，比如过流保护和低电压保护，这两种情况脱网危险因子的构造方法相似，欠量保护的构造如下所示：

$$\lambda_{i,j} = \begin{cases} 0, & x > x_{\text{set,qd}} \\ k(x_{\text{set,qd}} - x)^2 / (x_{\text{set,qd}} - x_{\text{set,dz}})^2, & x_{\text{set,qd}} \geq x \geq x_{\text{set,dz}} \\ k + (1-k)\sqrt{1 - (t_{\text{set}} - t)^2 / t_{\text{set}}^2}, & x \leq x_{\text{set,dz}} \ \& \ t < t_{\text{set}} \\ 1, & x \leq x_{\text{set,dz}} \ \& \ t \geq t_{\text{set}} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\lambda_{i,j}$ 代表的是第 i 台风电机组对第 j 种保护的脱网风险因子； x 表示当前保护动作用量； $x_{\text{set,qd}}$ 代表保护启动定值； $x_{\text{set,dz}}$ 代表保护动作定值； t_{set} 代表此种保护的动作用量延时； k 代表界值系数，需要根据

判据定值来决定。

λ_i 与 t 的关系如图 1 所示。

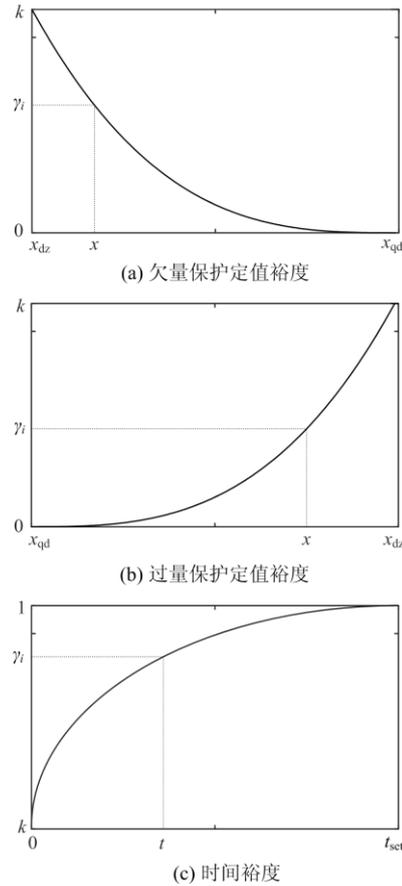


图 1 机组脱网危险因子的定量表示方法

Fig. 1 Quantitative representation of off-grid risk factor

针对欠量保护的跳闸判据，当保护动作用量比 $x_{\text{set,qd}}$ 大的时候，保护依旧未启动，则认为在当前时间该机组不会因为该保护而跳闸，脱网危险因子因此置 0；而当故障的发生导致保护动作用量 x 下降到 $x_{\text{set,qd}}$ 与 $x_{\text{set,dz}}$ 之间的时候，保护已经启动，然而还没达到保护定值 $x_{\text{set,dz}}$ ，此时保护动作用量 x 与动作整定值 $x_{\text{set,dz}}$ 之间的裕度将决定机组的脱网风险程度。当 $(x_{\text{set,qd}} - x) / (x_{\text{set,qd}} - x_{\text{set,dz}})$ 的数值大于 0 且逼近 0，此时动作用量已经在保护启动值的附近，但尚未达到动作整定值，此时故障程度较轻，机组本体保护发生动作概率较低；而当 $(x_{\text{set,qd}} - x) / (x_{\text{set,qd}} - x_{\text{set,dz}})$ 数值逼近 1 但小于 1 的时候，动作用量还没到达整定值，但已十分接近，表明此时故障程度较为严重，机组脱网风险较大；当 $(x_{\text{set,qd}} - x) / (x_{\text{set,qd}} - x_{\text{set,dz}})$ 大于 1 的时候，保护动作用量达到整定值，机组脱网概率应随时间推移快速增高，由于故障程度比较严重，在保

护启动之后的初始时间段内, 风机脱网的危险因子应显著上升; 若一定时间内故障仍未消除, 那么机组的脱网概率将变得非常高。这里值得指出, 式(6)中的构造并不唯一, 本文之所以将其构造为凸函数的性质, 目的是说明若故障无法及时消除, 机组脱网概率则将显著提高。

其中, 界值系数 k 的选择与延时整定定值相关, 取值范围在 $[0, 1]$ 。如果该保护瞬时动作, k 应该取 1。

第二类过量跳闸判据的分析方法与过程和第一类相似, 这里不再赘述。

2) 针对第二类跳闸判据的脱网风险因子的表示

第二类电气量波动越限的保护, 是在一定时间范围内, 保护动作越限的持续时间长度达到整定值保护跳闸。所以不能再用定值裕度与时间裕度来评判, 而应该考虑动作持续与整定值之间的关系, 构造脱网风险因子表示为

$$\lambda_{i,j} = \sum t_{\text{act}} / t_{\text{set}} \quad (7)$$

式中: t_{act} 代表当前保护越限的时间; t_{set} 代表动整定值。

在上面的判据中, 如果保护已经复归且机组依然在运行状态, 该机组脱网危险因子恢复置为 0。

单台机组的脱网危险因子则是应该在各类跳闸判据的脱网风险因子中取最大的, 即

$$\lambda_i = \max\{\lambda_{i,1}, \lambda_{i,n}\} \quad (8)$$

2.2 风电场的动态脱网风险表示

研究整座风电场脱网的风险时, 机组脱网的总功率及动态过程是需要着重被考量的方面, 其主要包含两方面的内容: 1) 目前可能脱网的基础功率, 2) 事态发展过程中的动态脱网功率。

将目前风电场可能的脱网功率指标定义为

$$P_{\lambda 0} = \sum_{i=1}^N \lambda_i P_i \quad (9)$$

式中: $P_{\lambda 0}$ 代表风电场可能的脱网功率指标; λ_i 代表第 i 台机组的脱网风险因子; P_i 代表启动前该机组的功率。

将风电场脱网风险的动态评价指标定义为 ΔP_{λ} :

$$\Delta P_{\lambda t} = P_{\lambda 0 t} - P_{\lambda 0 |_{(t-kT)}} \quad (10)$$

其中: $P_{\lambda t}$ 代表当前时刻 t 的脱网功率指标; $P_{\lambda(t-kT)}$ 代表 kT 时刻的脱网功率指标。

这里采用动态评价指标具有实际意义, 能够对脱网动态过程中的功率做到更全面的评价, 有利于阻止故障向更严重的方向演变。当 ΔP_{λ} 大于 0 时, 代表未来的一段时间内, 风电场脱网功率有可能上升, 即代表事态可能向更严重的方向发展, 则该风

电场应当优先被切除; 而当 ΔP_{λ} 小于 0 时, 代表脱网功率正在减少, 该风电场事态正趋于平息。

综合以上的分析, 整座风电场的总脱网风险评价指标表述为

$$\begin{cases} P_{\lambda} = P_{\lambda 0} + m \Delta P_{\lambda} k T \\ \xi = P_{\lambda} / \sum P \end{cases} \quad (11)$$

其中: P_{λ} 代表计及动态过程的总脱网功率指标; ξ 代表计及功率及动态过程的风电场脱网系数; 特别地, 为尽量降低脱网不确定性对动态过程的影响, m 取值应尽可能小。

依据上述模型表示, 上级稳定控制主站就能够根据式(6)一式(11)得到各风电场的脱网风险评价指标, 并根据排序结果, 优先切除脱网风险较高的风电场, 或者是在分配切机量时为脱网风险高的风电场设定较大权重; 同时, 各风电场在执行精确切机的时候, 可优先切除脱网风险相对较高的机组, 从而实现新能源的精益化、最优化控制。

3 仿真分析

本文借助 Matlab/Simulink 平台, 搭建了包含有双馈风电机组的风电场仿真系统。为了提高仿真的便利, 简化为分别搭建两条长 10 公里集电线路, 等间距挂载 10 台机组, 并在集电线路中采用中性点不接地的方式运行该系统。本文的风电场仿真模型如图 2 所示。

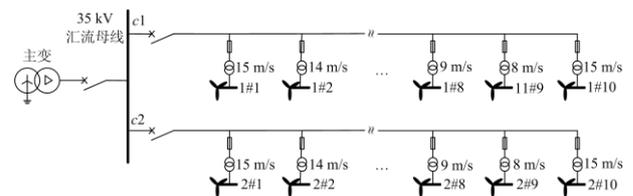


图 2 风电场集电线路仿真模型

Fig. 2 Wind farm collector line simulation model

在该系统中, 为简化分析, 本文的仿真案例选取了 3 种典型的机组本体保护, 分别是: 定子过流保护、定子低电压保护及直流侧过电压保护。各保护动作门槛和时限如表 1 所示。

表 1 机组典型本体保护定值

Table 1 Typical protection set of wind generator		
保护类型	动作门槛/p.u.	动作时限 t /ms
定子过流	1.8	500
	$U < 0.9$	$t > 2000$
定子低电压	$U < (509t - 118)$	$625 < t < 2000$
	$U < 0.2$	$t < 625$
直流侧过压	1.3	200

3.1 单台机组脱网危险因子仿真分析

仿真模拟系统近端在 1 s 时发生相间接地故障，电压数值跌落到 $0.21U_n$ 。单台机组各本体保护的脱网危险因子如图 3 所示。

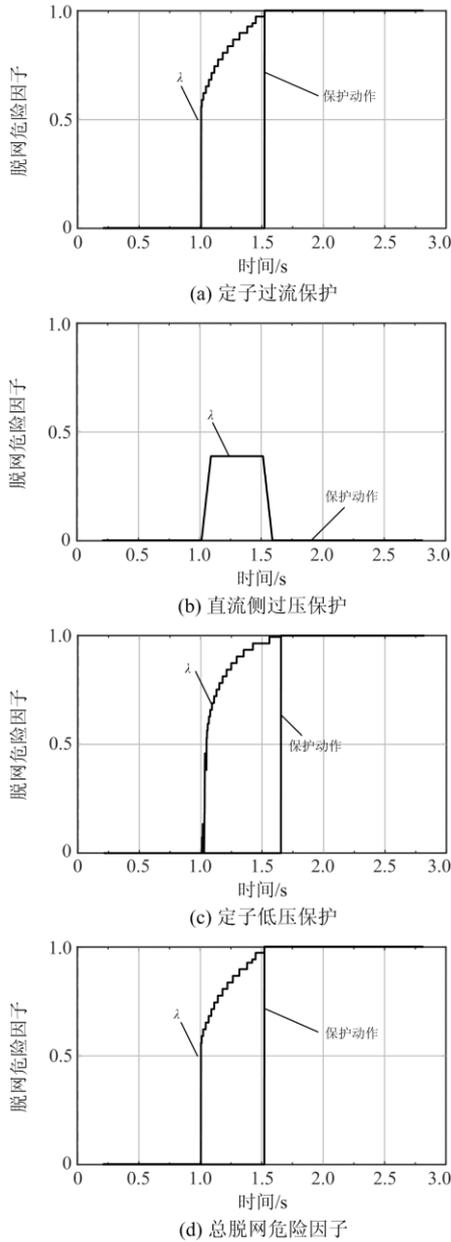


图 3 近端故障时机组脱网危险因子

Fig. 3 Off-grid risk factor under fatal fault

在本次实验中，机组因为定子过流保护而跳闸。各本体保护的脱网危险因子在故障发生后都快速上升，分别于各自动作时刻增加到最大值 1；同时机组总的脱网危险因子也呈现出快速上升趋势，在跳闸出口时增加到最大值 1；然而直流侧因为过压保护没有达到整定延时，本次没有动作，其脱网危险

因子迅速上升后又下降回归到 0。

继续模拟系统远方 1 s 时发生相间接地故障，可以发现电压略微跌落到 $0.8U_n$ 。单台机组的各保护脱网危险因子变化情况如图 4 所示。

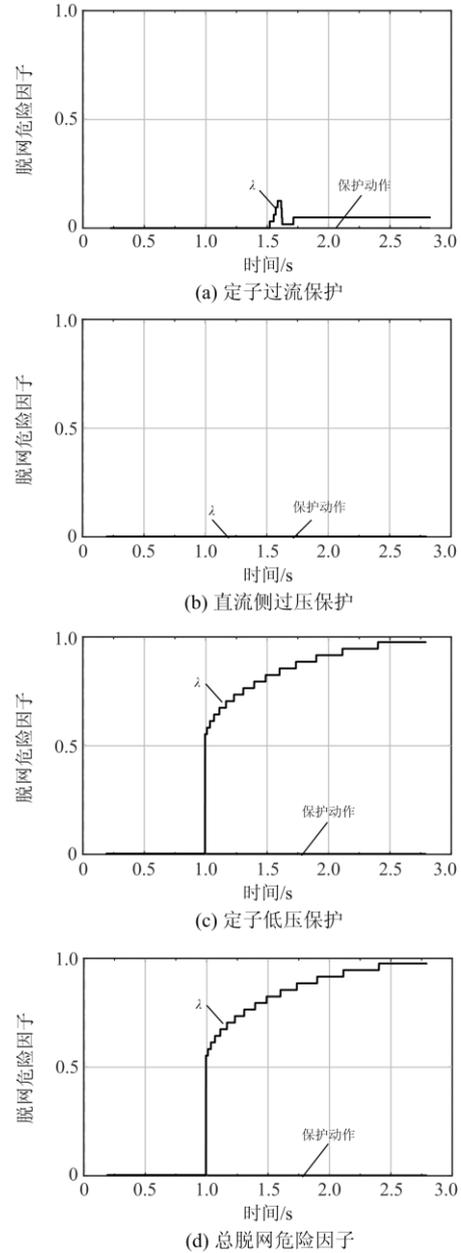


图 4 远端故障时机组脱网危险因子

Fig. 4 Off-grid risk factor under light fault

从上述实验可以看出，在远端发生故障之后，机组处感受到的电压跌落较小，故障程度较轻，除了定子低压保护之外，各类保护均没有动作，脱网危险因子也就维持在较低水平，未跟随时间呈现显著的上升。但是定子低压保护已经达到动作量，依据低电压穿越规定，这时风机应当能够连续不脱网

0.625~2 s, 没有到达其时间整定值, 所以脱网危险因子随着时间递推而快速增加, 这时定子低电压保护将主导风机的脱网风险。

从以上的实验与分析不难得出, 本文提出的脱网风险在线评判方法, 着眼于导致风电场脱网的直接原因, 能够较为真实地反映风电场脱网风险的大小, 而不需要如传统方法一般, 事先构造事故预想集, 从而避免了由于风机理论模型不完善或者事故预想集构造不完善等原因而导致的预测结果不精确。

3.2 风电场脱网风险的仿真分析

本实验将模拟系统发生故障时的情况, 电压下降到 $0.1U_n$, 之后电压逐渐上升恢复到 $0.95U_n$, 电压变化过程如图 5 所示。

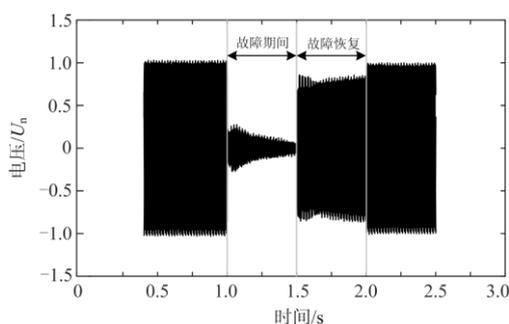


图 5 故障期间机端电压

Fig. 5 Stator voltage during fault

部分机组因为本体保护动作, 相继跳闸脱网, 而其他本体保护未动作的机组, 依然保持联网运行。

在故障发生期间, 风电场的实际脱网功率(称之为实际值)以及采用本文方法计算的脱网功率指标(称之为计算值)随时间变化的曲线如图 6 所示。

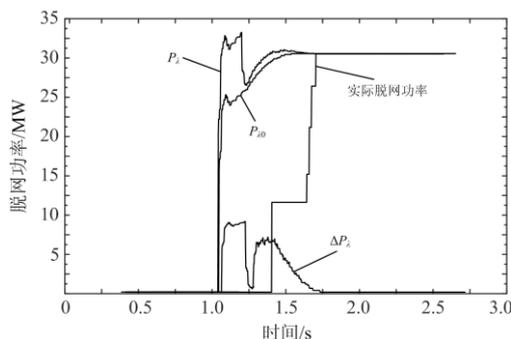


图 6 脱网功率指标的比较

Fig. 6 Comparison of off-grid power index

从图 6 中可以发现, 采用本文方法得到的计算值相对风电场的实际脱网功率拟合程度较高, 同时具备一定的“前瞻性”。对此, 存在合理解释, 机组保护动作决定了实际脱网功率, 而本文提出的在线判别方法本质上是基于保护动作裕度的预测。所以,

本文提出的机组脱网风险在线评判指标具备一定程度上的预测作用。而且在加入动态评价之后, 总体在线评判指标快速上升达到峰值, 风电场脱网的可能性比故障发生前大大增加; 然后动态指标又逐渐下降回归到 0, 说明伴随故障切除, 在电压恢复期间以及未来一段时间内, 风电场脱网的可能性逐渐降低。

4 结论

本文在建立风电场脱网风险数学模型的基础上, 提出了风电场脱网在线评断指标。并且通过 Matlab/Simulink 的仿真结果, 证实本文提出的脱网危险因子可以有效体现出风电机组脱网危险程度, 并为稳定控制系统中优化切机策略提供辅助依据。

结合上文的分析与表述, 本文提出的风险在线评判方法具备以下几大特点:

- 1) 考察致使风电机组脱网的直接缘由, 将机组本体保护的裕度视为脱网风险的评判指标;
- 2) 无需预先构造事故预想集, 从而可以避免因事故预想集构建不完全而导致脱网风险评价不精准的问题;
- 3) 对机组模型进行解耦, 只以本体保护动作特性作为评价指标的计算依据, 无需关注风电机组种类差异;
- 4) 计算效率高, 避免像传统算法对矩阵进行迭代, 有利于移植到嵌入式装置。

实验与分析中也发现, 尚存在以下需要进一步探究的部分:

- 1) 可能存在不同的定量表示方法来构造脱网风险因子, 如何构建更有效的定量评价指标, 还需进一步深入研究;
- 2) 由于信息交换的时效性需求, 进而要求信息交互在整个风电场和不同厂家的设备之间都具备高速互通性。

参考文献

- [1] 任祖怡, 赵明君, 夏尚学, 等. 安全稳定控制系统在新疆南部电网的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 104-107.
REN Zuyi, ZHAO Mingjun, XIA Shangxue, et al. Application of wide area protection and control system to Southern Xinjiang Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 104-107.
- [2] XUE L, XIONG Z, LEI W, et al. Transmission line over-load risk assessment for power systems with wind and load-power generation correlation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1233-1242.

- [3] 陈庆, 闪鑫, 罗建裕. 特高压交直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 147-151.
CHEN Qing, SHAN Xin, LUO Jianyu. Source-grid-load coordinated control strategy and its application under UHVDC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 147-151.
- [4] 毕平平, 许晓艳, 梅文明, 等. 风电基地连锁脱网风险评估方法及送出能力研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 903-910.
BI Pingping, XU Xiaoyan, MEI Wenming, et al. Study on cascaded tripping-off risk assessment method and delivery capacity of wind power base[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 903-910.
- [5] 刘文颖, 杨楠, 张建立, 等. 计及恶劣天气因素的复杂电网连锁故障事故链模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 53-59.
LIU Wenying, YANG Nan, ZHANG Jianli, et al. Complex grid failure propagating chain model in consideration of adverse weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 53-59.
- [6] 周红婷, 谢欢, 吴涛, 等. 张北高电压脱网事故中风电场动态行为分析与仿真[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 54-60.
ZHOU Hongting, XIE Huan, WU Tao, et al. Analysis and simulation of wind farm dynamic behavior in high-voltage trip-off accident of Zhangbei[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 54-60.
- [7] 陈麒宇, LITTLER T, 韩树山, 等. 风电机组脱网的风险评估(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 576-582.
CHEN Linyu, LITTLER T, HAN Shushan, et al. Risk assessment model for wind generator tripping off[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 576-582.
- [8] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based WECS during symmetrical voltage dips[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 36-47. DOI: 10.1186/s41601-019-0148-y.
- [9] TANG Y, HE H, WEN J, et al. Power system stability control for a wind farm based on adaptive dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(1): 166-177.
- [10] 韩平平, 陈凌琦, 胡迪, 等. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 99-105.
HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 99-105.
- [11] 尹纯亚, 李凤婷, 王丹东, 等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 95-102.
YIN Chunya, LI Fengting, WANG Dandong, et al. Research on stability control scheme for AC/DC hybrid transmission system with wind power high permeability under DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 95-102.
- [12] 何璇, 付元欢. 计及撬棒电阻的双馈风力发电机暂态电势故障特征分析[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 68-77.
HE Xuan, FU Yuanhuan. Analysis on transient EMF fault characteristics of DFIG considering crowbar resistance[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 68-77.
- [13] 向昌明, 范立新, 蒋一泉, 等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 91-97.
XIANG Changming, FAN Lixin, JIANG Yiquan, et al. Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 91-97.
- [14] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 152-159.
- [15] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
QI Shangmin, LI Fengting, HE Shi'en, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [16] 翟学, 曲名新, 齐清. 考虑抑制 DFIG 负序电流策略的配电网故障定位[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 29-34.
ZHAI Xue, QU Mingxin, QI Qing. Fault location of distribution network considering strategy of suppressing DFIG negative sequence current[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 29-34.
- [17] 卓毅鑫, 李凌, 赵成斌, 等. 一种基于振荡发散速率的次同步振荡风电场精准切机策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 164-172.
ZHUO Yixin, LI Ling, ZHAO Chengbin, et al. A precision wind farm tripping strategy under sub-synchronous oscillation situation based on oscillation divergence rate[J].

- Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 164-172.
- [18] 卓毅鑫, 徐铝洋, 张伟, 等. 基于决策树体系的预想故障集下风电场扰动风险测度评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 2): 143-152.
ZHUO Yixin, XU Lüyang, ZHANG Wei, et al. Disturbance risk measure of wind farm based on decision trees under contingency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 143-152.
- [19] 葛江北, 周明, 李庚银. 风电场抵御连锁脱网能力评估及指标灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 4-11.
GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin, et al. Immunity capability assessment of wind farms against cascading trip-off and indicators sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 4-11.
- [20] DIAO R, VITTAL V, LOGIC N. Design of a real-time security assessment tool for situational awareness enhancement in modern power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 957-965.
- [21] 丰颖, 负志皓, 周琼, 等. 考虑风电接入的在线风险评估和预防控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 61-68.
FENG Ying, YUN Zhihao, ZHOU Qiong, et al. Online risk assessment and preventive control considering wind-power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 61-68.
- [22] NI M, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.
- [23] 王森, 薛永端, 王洪俭, 等. 考虑多参数影响的风电场多状态出力概率性评估[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 69-77.
WANG Sen, XUE Yongduan, WANG Hongjian, et al. Probabilistic assessment of multi-state output of wind farms considering the effects of multi-parameters[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 69-77.
- [24] 施涛, 李春来, 朱慧敏. 考虑功率预测不确定性的风电消纳随机调度[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(4): 55-59.
SHI Tao, LI Chunlai, ZHU Huimin. Stochastic dispatching of wind power accommodation considering uncertainty of power prediction[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(4): 55-59.
- [25] 风电场接入电网技术规定: Q/GDW1392—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2015.
Technical rule for connecting wind farm into power grid: Q/GDW1392—2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.
- [26] 胡家兵. 双馈异步风力发电机系统电网故障穿越(不间断)运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
HU Jiabing. Investigation on the ride-through operation of DFIG-based wind power generation systems during grid fault[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [27] 顾威, 任祖怡, 文贤馐, 等. 含 DFIG 风电场的电网稳定性分析[J]. 电气应用, 2016, 35(11): 16-21, 27.
GU Wei, REN Zuyi, WEN Xiankui, et al. Stability analysis of power grid with DFIG wind farm[J]. Electric Application, 2016, 35(11): 16-21, 27.
- [28] 陆崎, 任祖怡, 徐柯, 等. 基于隐枚举法的稳定控制优化切机方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 139-144.
LU Qi, REN Zuyi, XU Ke, et al. Optimal generator rejection scheme based on implicit enumeration method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 139-144.

收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-07-24

作者简介:

李祖明(1962—), 男, 副教授, 研究方向为新型电机测控技术、电力系统故障检测技术等;

张星宇(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: jsrgzxy5@163.com

(编辑 魏小丽)