

基于广义等效法的含大规模风电接入的发电系统可靠性评估

张择策, 沈天时

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 只含有传统机组的发电系统, 由于可将机组简化为两种状态模型, 采用蒙特卡洛模拟法模拟机组状态, 其可靠性评估较易实现。由于风的随机性和间歇性, 在含有大规模风电接入的发电系统中, 不能简单将风电机组看成两种状态模型。因此, 提出广义等效法, 将风电机组群一步步等效成 1 个传统机组, 并引入 z_{zc} 系数定义了该等效机组的平均稳定工作时间 MTTs。选取 RTS79 系统作为算例, 考虑大规模风电的接入, 使用广义等效法计算可靠性指标 EENS 和 LOLE, 并与传统蒙特卡洛模拟法的结果进行比较。所提方法为简化风电机组群模型提供了思路, 对含大规模风电接入的发电系统可靠性评估有一定指导作用。

关键词: 风电; 可靠性评估; 广义等效法; z_{zc} 系数; MTTs

Abstract: The reliability of power system which only consists of traditional generators is easy to be assessed using Monte Carlo simulation because the generators can be simplified to a two-state model. But the wind turbine generator system cannot be treated as a two-state model in power system considering large-scale wind power integration due to the randomness and intermittent of wind. Hence, generalized equivalent approach is put forward. In this method, wind turbine generator system can be equivalent to a traditional generator step by step and a coefficient named z_{zc} is introduced to define the equivalent generators' average time of steady operation—MTTs. The RTS79 system is chosen as an example. Considering the large-scale wind power integration, the reliability index like EENS and LOLE are calculated using generalized equivalent approach and its outcomes are compared to those using traditional Monte Carlo simulation. It provides an idea to simplify the model of wind turbine generator system, which has guiding meaning to the reliability assessment of power system considering large-scale wind power integration.

Key words: wind power; reliability assessment; generalized equivalent approach; coefficient of z_{zc} ; MTTs

中图分类号: TK89 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)03-0073-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.017

0 前言

发电系统可靠性在电力系统可靠性中至关重要, 它直接影响电能的充裕度。风力发电是可再生发电形式中技术最成熟、最具开发规模和商业化前景。然而风在时间和空间上鲜明的间歇性和波动性会造成风机出力不稳, 这对发电系统可靠性指标的传统计算方式产生了冲击^[1-4]。

许多研究者认为, 可以将风电机组看成 1 个多状态机组进行处理, 这在一定程度上计入了风电本身的特征。然而, 风电机组容量小、数量多, 若用传统的模拟法模拟机组状态, 在风机数量增多或者风机状态数增多时, 将会造成极大的运算量^[5-8]。

下面提出了广义等效法, 基于概率分布的理论

使用按权分配的方法将风电机组群一步步等效成一个传统机组, 为实现计算的统一性, 引入 z_{zc} 系数定义了该等效机组的平均稳定工作时间 MTTs。为简化风电机组群模型提供了思路, 对含大规模风电接入的发电系统可靠性评估有一定指导作用。

1 广义等效法

传统模拟法难以处理大规模多状态风电机组群, 其根本原因是将风电机组的地位看成是与传统机组平等的。大量研究者认为, 在发电系统可靠性评估中, 既然对每个传统机组要单独模拟其状态和状态持续时间, 那么对于风电机组也应该做同样的处理^[9-11]。这样的思路无疑是忽略了风电机组本身的一些特点。在实际风电机组群中, 是大量完全

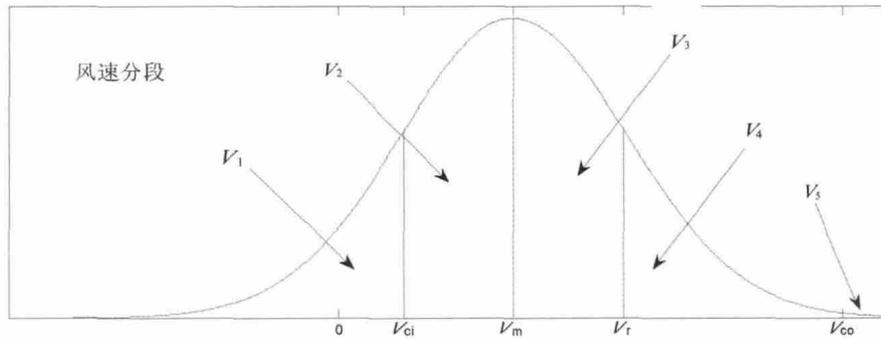


图1 风速分段

相同的风电机组,它们容量很小,往往整个风电机组群的总容量才相当于1个传统机组。

因此,提供的思路是将整个风电机组群对发电系统的影响看成是1个等效机组的影响,而在可靠性指标计算中将该等效机组看成传统机组进行处理。广义等效法的实质是在预处理阶段计入风电的间歇性和波动性,而等效后就看成传统机组参与状态模拟,以节省模拟的运算量。

1.1 风电机组群的容量等效

标准正态分布已在工程实践中得到广泛应用,假设当某地的风速统计数据足够长时,则在统计时间内的风速可近似的服从正态分布^[8]。

将风速分布划分为如下5个区段^[12]:小于切入风速 V_{ci} 、切入风速 V_{ci} 和平均风速 V_m 之间、平均风速 V_m 和额定风速 V_r 之间、额定风速 V_r 和切出风速 V_{co} 之间以及大于切出风速 V_{co} ,即将所有风速分为落入图中5个区段的5种风速 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 ,其中,取 $V_2 = 0.5 \times (V_{ci} + V_m)$, $V_3 = 0.5 \times (V_m + V_r)$ 。另外,根据风功率 P 与风速 V 的关系, V_1 、 V_4 、 V_5 对应的 P 为已知值。

风速分段如图1所示。由于风速服从正态分布,5种风速所对应的概率也容易得到,见表1。

表1 5种风速及其概率

风速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
概率	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5

风功率 P 与风速 V 的关系如下。

$$P = \begin{cases} 0, & V < V_{ci} \\ P_r \times \frac{(V - V_{ci})^3}{(V_r - V_{ci})^3}, & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r, & V_r < V \leq V_{co} \\ 0, & V > V_{co} \end{cases}$$

易得各风功率值及其概率,见表2。

表2 各风功率及其概率

风功率/MW	P_1	P_2	P_3	P_r
概率	$p_1 + p_5$	p_2	p_3	p_4

其中 $P_1 = 0$,假设风电机组群由 n 台额定容量为 P_r 的风机组成,忽略尾流效应,定义风电机组群的等效容量:

$$P_w = n(p_2 \times P_2 + p_3 + p_4 \times P_r)$$

至此,将整个风电机组群看成1台容量为 P_w 的传统机组。

1.2 风电机组群的参数等效

传统机组参与计算的参数有容量 P 、强迫停运率FOR、平均故障修复时间MTTR和平均无故障工作时间MTTF。上节已得到等效容量 P_w ,为实现等效,还需要得到风电机组群的广义停运率 FOR_{BS} 、平均故障修复时间 MTTR' 和1个在公式中用来代替MTTF,表征风电出力稳定性的时间参数——平均稳定工作时间MTTS。

FOR_{BS} 定义为理论上风机出力为0的频率,即历史风速数据中风速小于 V_{ci} 以及大于 V_{co} 的频率。 MTTR' 与常规机组一样定义为修复率 μ 的倒数。

MTTS的定义如下。

首先定义 k 率,用于表征出现各个不同相邻风速波动的频率。即比较每个相邻小时风速差值的绝对值,设历史数据共有 m 个小时,则

```

while( $t \leq m$ ) do  $|V_{t+1} - V_t|$ 
case1:  $|V_{t+1} - V_t| = 0$   $k'_0 + +$ 
case2:  $0 < |V_{t+1} - V_t| \leq 5$   $k'_1 + +$ 
case3:  $5 < |V_{t+1} - V_t| \leq 10$   $k'_2 + +$ 
case4:  $10 < |V_{t+1} - V_t| \leq 15$   $k'_3 + +$ 
case5:  $k'_{else} + +$ 
end
    
```

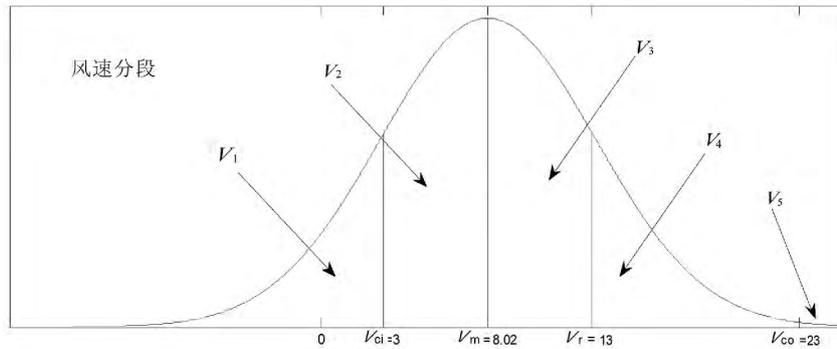


图 2 实际风速分段

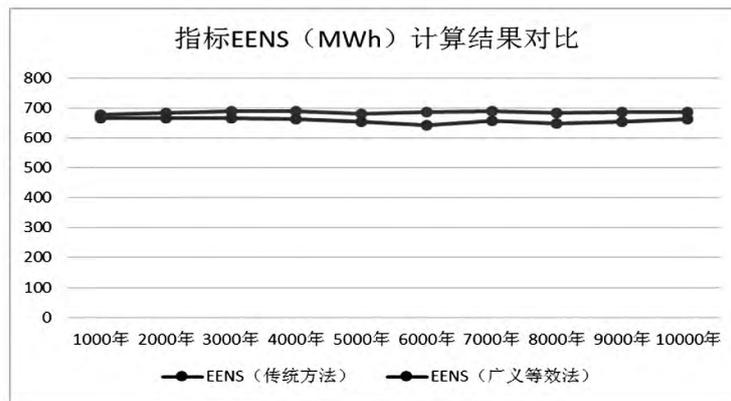


图 3 EENS 结果对比

$$k_0 = k'_0/m \quad k_1 = k'_1/m \quad k_2 = k'_2/m \quad k_3 = k'_3/m \quad k_{else} = k'_{else}/m$$

不同 k 率对风机不稳定性的贡献是不同的,因此定义 $z z c$ 系数与 z 率,假设相邻 k 率对 z 率的贡献相差 10 倍,公式如下:

$$z = z z c \times \sum_{i=1}^n k \times 10^{i-1}$$

z 率表征风机综合不稳定性,其中 $z z c$ 系数用于调整 z 率的数量级。类比传统机组 M T T F 的定义,取 z 率的倒数 $1/z$ 为平均稳定工作时间 M T T S。

2 算例与分析

2.1 算例计算

为验证广义等效法的有效性,下面选用 RTS79 系统作为算例,该系统含有 32 台火电机组,总容量 3 405 MW,年负荷选用 RTS79 系统负荷数据。已知各单台机组的额定容量、强迫停运率 FOR、平均故障修复时间 M T T R 和平均无故障工作时间 M T T F。考虑 300 台额定功率为 1.5 MW 的风机(修复率已知)接入发电系统,此时的风电渗透率为 11.67%。

历史风速数据使用 5 年(43 648 h)的风速数

据,其中:

$$V_m = 8.02 \text{ km/h}, \sigma = 5.19 \text{ km/h}, V_{ci} = 3 \text{ km/h}, V_{co} = 23 \text{ km/h}, V_r = 13 \text{ km/h}$$

风速分布曲线如图 2 所示。

按风速服从正态分布计算出 5 种风速所对应的概率 $p_1 \sim p_5$ 见表 1。

表 3 5 种实际风速及其概率

风速 /($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
概率	0.165 3	0.334 7	0.329 5	0.168 5	0.002 0

再由风功率 P 与风速 V 的关系得到各风功率值及其概率,见表 4。

表 4 各实际风功率及其概率

风功率/MW	0	0.098 1	0.787 7	1.5
概率	0.167 3	0.334 7	0.329 5	0.168 5

计算出等效容量 $P_w = n \times (p_2 \times P_2 + p_3 \times P_3 + p_4 \times P_4) = 245.314 \text{ MW}$,选取风机修复率为 0.006 7,计算出平均故障修复时间 M T T R' 为 149.253 7 h 的风机,广义停运率 FOR_{BS} 为 0.095 9,按照 1.2 的办法求得不同 $z z c$ 系数下的 z 率, M T T S 如表 5 所示。

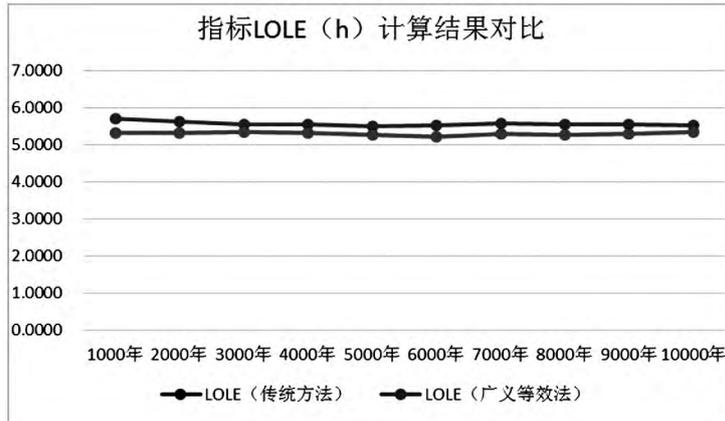


图4 LOLE结果对比

表5 不同z_{zc}系数下的z率和MTTS

z _{zc} 系数	z率	MTTS/h
z _{zc} = 0.002 5	0.022 5	44.444
z _{zc} = 0.003 0	0.027 0	37.037
z _{zc} = 0.003 5	0.031 5	31.746

至此,将300台组成1.5 MW的风电机组群看做RTS系统的第33台传统机组,计算中代入参数 P_w 、 FOR_{BS} 、 $MTTR$ 和 $MTSS$,广义等效完成。

2.2 结果分析

以z_{zc}系数取0.003为例分析,用传统的序贯蒙特卡洛法和广义等效法分别模拟1000年、2000年……10000年的情况,比较指标EENS和LOLE,如图3和图4所示。

从图中可以看出使用广义等效法计算出的指标结果和传统方法的计算结果差别很小,下面再考察指标EENS和LOLE的精度,如图5所示。

当模拟10000年时,各结果的比较如表6所示。

从表6中数据可以看出,当模拟10000年时,使用广义等效法与使用传统方法得到的指标差值百分比在5%以下,而指标精度在0.02之上,由此可见广义等效法是有效的。

表6 计算结果

	传统方法	广义等效法	两法的差值	差值百分比/%	计算精度
EENS /MWh	686.29	661.72	24.57	4	0.019
LOLE/h	5.54	5.35	0.19	3	0.015

3 结论

1) 传统蒙特卡洛模拟法评估含大规模风电接

入的发电系统可靠性,其难点在于风机数量增多或风机状态数增多时,运算量很大。小容量风机和传统机组在系统中的地位是不平等的。所提出了广义等效法,将风电机组群一步步等效成1个传统机组。

2) k率表征出现各个不同相邻风速波动的频率,z率表征风机综合不稳定性,不同k率对z率的贡献不同,假设相邻k率对z率的贡献相差10倍,引入z_{zc}系数后定义等效机组的平均稳定工作时间MTTS。

3) 选取RTS79系统作为算例,考虑大规模风电(渗透率达11.67%)的接入,使用广义等效法计算可靠性指标EENS和LOLE,当模拟10000年时(精度均在0.02上)结果分别为661.72 MW和5.35 h,与传统蒙特卡洛模拟法的结果相比误差均在5%以内,有效性显而易见。

4) 广义等效不仅是一种方法,更是一种思维。所提方法为简化风电机组群模型提供了思路,对含大规模风电接入的发电系统可靠性评估有一定指导作用。

参考文献

- [1] 余民,杨晏宸,蒋传文,等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012(12): 100-104, 135.
- [2] 蒋泽甫. 风电转换系统可靠性评估及其薄弱环节辨识[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [3] 雷潇. 风电机组短期可靠性预测模型与风电场有功功率控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [4] 何禹清,彭建春,孙芊. 考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J]. 中国电机工程学报, 2010(13): 16-22.
- [5] Dobakhshari, A. S. and M. Fotuhi - Firuzabad. A Relia-

bility Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2009, 24(3): 792 - 801.

[6] Haghi, H. V., S. M. Hakimi, and S. M. M. Tafreshi. Optimal Sizing of a Hybrid Power System Considering Wind Power Uncertainty Using PSO - embedded Stochastic Simulation [C]. in Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on. 2010.

[7] 鲍晓慧, 侯慧. 电力系统可靠性评估述评 [J]. 武汉大学学报: 上海工学版, 2008(4): 96 - 101.

[8] 蒋小亮. 风电并网对电力系统可靠性和备用影响研究 [D]. 上海交通大学, 2011.

[9] 曲翀, 王晋丽, 谢绍宇, 等. 不同风速模型和可靠性指标对风电可信容量评估的影响 [J]. 电网技术, 2013

(10): 2896 - 2903.

[10] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008(4): 9 - 15.

[11] 王学良. 风电场可靠性评估研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[12] Karki, R., H. Po, and R. Billinton. A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 533 - 540.

[13] Sulaeman, S., M. Benidris, and J. Mitra. A Method to Model the Output Power of Wind Farms in Composite System Reliability Assessment [C]. in North American Power Symposium (NAPS) 2014.

(收稿日期: 2015 - 02 - 12)

(上接第49页)

参考文献

[1] 梁国艳, 梁中华. 电流互感器饱和的检测方法及在微机母线保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2006(12): 66 - 70.

[2] 王燕. 电流互感器的误差及其对继电保护的影响 [J]. 东北电力技术, 2009(1): 66 - 70.

[3] 王优胤. 大型发电机变压器组差动保护用电流互感器选型 [J]. 东北电力技术, 2010(6): 25 - 28.

[4] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012(11): 24 - 27.

[5] 景敏慧, 孔萧迪. P类电流互感器饱和原因分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2007(11): 45 - 48.

[6] 任先文, 徐宏雷, 孙楷琪. 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009

(3): 30 - 33.

[7] 邓旭阳, 索南加乐, 李广. 基于参数识别的电流互感器的识别原理研究 [J]. 电力系统自动化, 2010(8): 42 - 45.

[8] 陈建玉, 孟宪民, 王志华. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2004(10): 32 - 35.

[9] 柳树. 电流互感器饱和过程分析及对策 [J]. 华北电力技术, 2009(3): 37 - 40.

[10] 陈玥名, 崔广泉, 刘长江. 电力电流互感器检测试验方法研究 [J]. 东北电力技术, 2009(11): 3 - 6.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士, 工程师, 目前从事继电保护装置运维检修工作;

王锐(1975), 本科, 高级工程师, 主要从事变电检修技术工作。
(收稿日期: 2015 - 02 - 02)

(上接第57页)

参考文献

[1] 郭小江, 郑超, 尚慧玉, 等. 西藏中部同步电网安全稳定控制研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(6): 87 - 92.

[2] 吕虎, 谢国平, 朱艺颖, 等. 青藏直流接入西藏电网数模混合仿真 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 455 - 459.

[3] 唐晓骏, 刘东冉, 陈麒麟, 等. 青藏直流接入后西藏地区电网电压/无功控制 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 94 - 99.

[4] 赵文强, 王杨正, 李林, 等. 青藏直流联网工程大负荷

试验策略研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3052 - 3058.

[5] 吴冲, 刘汉伟, 董卫国, 等. 青藏直流联网后藏中电网安全稳定控制系统的重构 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 54 - 57.

[6] 李惠军, 汤奕, 李雪明, 等. 电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运设置原则分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 141 - 145.

作者简介:

王郑锋(1982), 工程师, 主要研究领域为电网规划设计。

(收稿日期: 2015 - 02 - 28)