

Operational Risk Assessment of Power System Including Large-Scale Wind Farms

Dezhi Chen¹, Yunting Song¹, Yunsi Huang², Zhongxu Gao², Anjia Mao²

¹China Electric Power Research Institute, Beijing

²School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Email: chendz@epri.sgcc.com.cn, syt@epri.sgcc.com.cn, easaohang@163.com

Received: Nov. 6th, 2013; revised: Nov. 11th, 2013; accepted: Nov. 12th, 2013

Copyright © 2013 Dezhi Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Due to the randomness, intermittent and fluctuation characteristics of wind energy, the negative effects brought by large-scale wind farms when they are connected to the power system cannot be neglected. Large scale wind farm connected to power grid will bring operational risk to the grid. Based on the theoretical framework of operational risk assessment, this paper established the corresponding operational risk assessment index system, which reflects the system's short-term level of the operational risk from the local and system level respectively. At last, the accuracy of the established assessment index system is proved based on the IEEE-RTS79 system.

Keywords: Wind Farm; Power System; Operational Risk Assessment

含大规模风电场的电力系统运行风险评估

陈得治¹, 宋云亭¹, 黄昀思², 高忠旭², 毛安家²

¹中国电力科学研究院, 北京

²华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

Email: chendz@epri.sgcc.com.cn, syt@epri.sgcc.com.cn, easaohang@163.com

收稿日期: 2013年11月6日; 修回日期: 2013年11月11日; 录用日期: 2013年11月12日

摘要: 由于风能具有随机性、间歇性与波动性等特点, 致使当大规模风电场接入电力系统后, 会给系统造成不可忽视的负面影响, 从而给电网的安全稳定运行带来风险。本文基于运行风险评估框架理论体系, 建立了相应的运行风险评估指标体系, 分别从局部级和系统级两个层面反映系统的短期运行风险水平。最后, 基于IEEE-RTS79验证上述所建评估框架理论体系的正确性。

关键词: 风电场; 电力系统; 运行风险评估

1. 引言

在化石能源的日渐枯竭、环境形势日趋严峻的背景下, 开发洁净的可持续能源已经成为国家能源发展的基本战略。风能具有分布范围广、可再生、零排放、开发技术成熟等优点, 随着风电开发成本日益降低, 风力发电逐渐被认为是最具发展规模与市场竞争力的可再生能源发电形式^[1]。在我国, 截至2012年底,

风电累计装机容量已达到75.6 GW, 已超过核电装机容量, 成为继煤电和水电之后的第三大主力电源^[2]。

尽管风电相对于火电机组具有绿色无污染、运行成本低、持续可再生等优势, 但是, 由于风能所固有的随机性、间歇性、波动性、不可控, 以及能量密度低等自然特征, 致使风电机组难以像普通机组那样平稳地进行功率调节。当大量风电机组接入电网后, 给

系统的计划、调度、调频、调峰等方面产生不可忽视的负面影响,从而给电网的安全稳定运行带来了风险^[3-5]。因此,必须对含有大规模风电的电力系统的运行开展风险评估,寻求规避风险或减少风险损失的策略。

IEEE 将风险定义为事件发生的概率与其后果的乘积,因此,风险评估的过程,实际上就是确定系统运行中的扰动事件发生的概率和后果的过程^[6-8]。根据评估对象和范围的不同,目前关于电力系统运行的风险评估可以分为元件级和系统级 2 类。其中,元件级风险评估主要针对单个元件的状态所做出的评估,例如,文献[9]提出了一种基于马尔可夫过程的、利用元件的瞬时状态概率进行系统状态预测和评估的方法;文献[10]分析了实时运行条件对元件可靠性模型的影响,建立了基于单个运行条件与基于多个运行条件的元件停运率模型。文献[11]考虑多变的天气环境和电气量等运行条件对元件可靠性的影响,建立了基于支持向量机的天气预测模型,并将其与元件短期可靠性模型相结合,评估系统运行风险,实现薄弱环节的定位。系统级运行风险评估则是针对系统运行中的各种扰动事件,评估整个系统运行的安全水平。例如,文献[12]从系统运行角度出发,在设备故障率指数分布特性已知的前提下,基于马尔可夫链,建立可快速对电力系统运行风险进行评估的解析模型。文献[13]基于日发电计划推导出了各类元件的时间相关停运概率,并在故障后果分析中考虑了自动装置的调节作用,最后从失负荷量、越限程度和系统所处各类运行状态的概率三个方面构建了适合调度的运行风险指标。文献[14]提出运行可靠性在线控制的模型和算法,阐述运行可靠性在线控制的基础与功能定位,并且以控制代价量最小为目标函数,以发电机调整量和母线切负荷量为控制量,计及约束条件等建立其控制的数学模型。所有这些研究,为增进电力系统运行风险管理意识,提高风险管理水平做出了贡献。

本文结合我国电力系统发展现状,重点研究了风电大规模接入电网后,整个电力系统在运行过程中的风险评估,包括风险识别,评估模型和方法等。

2. 风电场接入电网的运行风险评估模型

当风电场接入系统并网运行后,由于其波动性和反调峰特性给系统的安全运行带来潜在的威胁。风速

的波动幅度随着时间尺度的增加而增大,况且,目前风速的预测还是一个世界性的难题,误差较大约为 25%~40%,使得日前制定的调度计划与实际运行情况相差较大,增加了系统的运行风险。基于此,采用运行风险评估理论评估风电场接入电网后的系统运行风险,无论是从时间尺度上,还是从面向的部门对象上都具有绝对的优势,下面就采用的元件模型以及潮流计算模型分别作具体阐述。

2.1. 元件短期可靠性模型

基于实时运行条件求得元件的实时停运率,考虑到运行风险评估周期较短,可假设在整个评估周期内元件的停运率和修复率不变,基于马尔可夫瞬时过程求出待评估时刻元件的停运率:

$$p(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (1)$$

式中, λ 和 μ 分别表示元件的停运率和修复率,由于在运行风险评估框架下,评估周期较短,元件的修复时间一般大于评估周期,可假设修复率为 0,则上式可简化为:

$$p(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

综上所述,运行风险评估过程中确定评估周期后,以其初始时刻系统的实时运行条件求取相对应的元件停运率,基于马尔可夫瞬时过程,计算元件待评估时刻的停运率,建立元件的短期可靠性模型,通过运行风险评估表征系统运行风险水平。

2.2. 含风电场的潮流计算模型

目前,风电场大部分采用的风电机组类型主要包括恒速恒频和变速恒频这两种。由于机组类型、特性和控制方式的不同,因此不能采用常规机组的处理方法将其看成是 PQ 或 PV 节点,需分别进行处理,具体如下:

1) 恒速恒频风电机组

恒速恒频风电机组大多采用异步发电机,因为本身没有励磁调节,不具备电压调节能力,所以不能像常规机组那样将其看成是 PV 节点,并且,异步发电机在发出有功功率的同时吸收无功功率,其吸收无功功率的大小与转差率和发出的有功相关,因此又不能将其简单地处理成 PQ 节点^[15]。异步发电机的等效“Γ”

形稳态电路图如图 1 所示。

由电路关系得：

$$s = -\frac{U^2 r_2 - \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_e^2 x_k^2 r_2^2}}{2P_e x_k^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s}\right) \quad (3)$$

$$Q_e = -\frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_e$$

式中， x_1 、 x_2 、 x_m 分别表示异步发电机的定子侧电抗、转子侧电抗和励磁电抗；其中， $x_k = x_1 + x_2$ ，由上三式联立可见，异步发电机的无功功率与其有功功率、转差率和机端电压有关，因此，在求解含风电场的潮流计算模型中，需结合异步发电机的稳态方程进行迭代计算。

2) 变速恒频风电机组

为研究含风电场的潮流计算模型，首先需建立双馈电机的稳态数学模型，再与常规潮流方程联立迭代计算。由于变流器传递的有功功率比较小，因而由变流器吸收或发出的无功功率很小，可以忽略，则变速恒频机组向电网输出的无功功率近似为定子侧的无功功率，根据文献[16]推导双馈风电机组的功率方程如下：

$$\begin{cases} P_e = P_s + P_r = \frac{r_r L_s^2 P_s^2}{L_m^2 |\dot{U}_s|^2} (1 + \tan^2 \varphi) \\ \quad + \left(1 + \frac{2r_r L_s \tan \varphi}{L_m} - s\right) P_s + \frac{r_r |\dot{U}_s|^2}{L_m^2} \\ Q_s = \tan \varphi \cdot P_s \end{cases} \quad (4)$$

式中， P_e 表示变速恒频机组向电网输送的有功功率； P_s 、 P_r 分别表示定子侧和转子侧向电网输送的有功

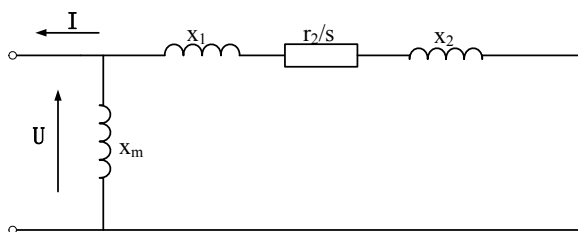


Figure 1. Steady-state equivalent circuit of induction motor
图 1. 异步电机稳态等效电路图

功率； r_r 表示转子绕组电阻； L_m 表示同步 dq0 坐标系下等效定子绕组与等效转子绕组间的互感； L_s 表示同步 dq0 坐标系下等效定子每相绕组全自感； φ 为功率因素角。

3. 风电接入电网运行风险评估指标体系

传统的可靠性评估的时间框架通常达数十年，所建立的可靠性指标反映的是系统长期运行可靠性水平，而运行风险理论评估的却是系统未来数分钟、数小时内的运行风险，因此传统的可靠性指标无法适用于运行风险评估理论，需建立新的指标体系。本文建立的风险指标分为以下三个方面：状态类指标、越限类指标和期望失负荷指标，现介绍如下：

1) 状态类指标

状态类指标主要从整体上反映系统短期运行风险的水平，将系统运行状态分为正常、越限和事故状态这三类。其指标计算公式为：

$$P_j = \sum_{k \in j} P_k \quad (5)$$

式中： j 表示系统处于某运行状态的集合。 P_k 表示第 k 次抽样系统处于运行状态 j 发生的概率。

2) 越限类指标

越限类指标主要反映系统或元件的越限状态，如电压越上限、下限、线路传输功率越上限、下限等，体现了系统运行中的薄弱环节。其计算公式为：

$$S_i = \left(\frac{\Delta x_i}{X_i} \times 100\right)^2$$

$$S_{evi} = \sum_{k \in M} P_k \cdot S_{i|k}$$

$$S_{evs} = \sum_{k \in M} P_k \sum_{i=1}^n S_i \quad (6)$$

式(6)中 X_i 为状态变量的额定值， Δx_i 表示状态变量的越限量，上标中的“2”是为了解决“遮蔽”缺陷而对越限量所进行的加权^[15]； S_{evi} 表示某元件的越限程度的期望值， M 表示越限状态的集合， P_k 表示某个越限状态发生的概率， $S_{i|k}$ 表示某越限状态 k 下的元件 i 的越限程度； S_{evs} 表示系统的整体越限程度的期望值， n 表示系统元件的个数。 S_{evi} 、 S_{evs} 分别从元件级和系统级两个层面反映状态变量的越限程度，当状态变量取为电压、线路传输功率等，即可求得元件级或系统

级的电压越限指标、功率越限指标。

3) 期望失负荷指标

期望失负荷指标反映了系统短期运行中可能损失的负荷量，其计算式为：

$$ELL_i = \sum_{k \in N} P_k \cdot C_{i|i \in k} \quad (7)$$

$$ELL_s = \sum_{k \in N} P_k \cdot \sum_{i=1}^n C_i \quad (8)$$

式(7)中， ELL_i 表示某负荷点的期望负荷损失值； N 表示系统切负荷状态的集合； C_i 表示某负荷点的切负荷量， P_k 表示某失负荷状态发生的概率； ELL_s 则反映了系统短期整体的期望失负荷水平， n 表示系统母线的个数。

在运行风险评估框架内，采用上述所建立的指标实时综合反映系统的运行风险，利用状态类指标从整体上反映了系统在某时刻的运行风险，并且采用期望失负荷指标和越限指标分别从元件级和系统级两个层面衡量越限程度和负荷损失，易于辨别系统的薄弱环节，易于调度员识别，及时对调度决策做出调整。

4. 算例分析

本文利用 IEEE-RTS79 系统测试所提方法。假设在母线 13 接入装机容量为 300 MW 的风电场 A，计算该风电场在评估周期内的预测功率，同时将风电场出力视作完全可靠纳入发电调度计划，重新修正母线 13 及其相邻母线的发电机出力，保证功率平衡。由于风电波动较强，系统不仅仅需要有足够的备用容量、还要具备足够的响应速度，因此，本文在考虑备用时，

只计及各机组能够在 10 min 内快速响应的备用容量，采用 MATLAB 实现程序的编制，计算结果如表 1。

由表 1 可知，装机容量为 300 MW 的风电场代替相同容量的常规机组接入大电网后，由于风电功率的波动性等因素，使得系统运行工况复杂多变。从线路功率越限的角度来说，风电场的接入使得各条线路功率越限程度发生了变化，如表 1 所示，在评估周期初始时刻，风电场的接入使得线路 11 功率越限程度与原始系统相比有所下降，而在后续的两个评估时刻，越限程度增大，之后又减小。此外，还可看出线路 28 相比原始系统总体上功率越限程度减小。

基于运行风险评估理论框架体系，可反映系统的短期运行风险，体现出系统的薄弱环节，如线路 11、线路 28 易发生功率越限，因此针对这些薄弱环节可提前做好防范工作，降低运行风险。

由表 2 可知，与原始系统相比，当 300 MW 风电场接入后，各母线期望切负荷量总体呈增加趋势，尤其是母线 13、15、18 期望切负荷量值较大，原因在于该相邻机组的装机容量较大，故障率也较高。

表 3 详细地反映了系统短期的整体运行风险水平，由表可知，若系统接入 300 MW 风电场后，则在评估周期内事故状态概率总体要大于原始系统，而警戒状态概率与临界状态概率则在不同的评估时刻呈现出不同的特性。但无论是否接入风电场，系统安全运行状态的概率都随着运行时间的增长而下降、警戒状态、临界状态、事故状态概率则逐渐上升，主要原因在于该评估周期内负荷逐渐增加，并且随着运行时间的增长，元件故障率也随之增加。

Table 1. Off-line index of line energy (unit: 10^{-3})
表 1. 线路功率越限指标(单位: 10^{-3})

	线路	首端	末端	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
无风电场接入	5	2	6	0	0	0.0479	0.0006	0.2773	0
	11	7	8	0.6845	4.0931	3.8544	125.0889	164.0287	113.3258
	28	16	17	0	0	36.9287	50.7440	61.7708	72.6284
	30	17	18	0	0	0	0	0	0.0025
300 MW 风电场	5	2	6	0	0	0.0014	0.2041	0	0.0167
	11	7	8	0.0531	9.6591	6.5320	74.0736	134.4317	80.4067
	28	16	17	0	0	22.5397	51.6552	109.7424	61.8950
	30	17	18	0	0	0	0	0.1279	0

Table 2. Expected load-shedding quantity of each bus bar (unit: 10^{-3} MW)
表 2. 各母线期望切负荷量(单位: 10^{-3} MW)

母线	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	
无风电	1	0	0	0	2.9979	5.8871	14.6409
	2	0	0	0.2030	2.5937	5.7226	11.4271
	7	0	0	0	5.1849	8.0096	18.3298
	8	0	0	0	0.6845	2.4508	1.7817
	13	0	0.3587	2.7760	10.4157	35.1666	74.7682
	14	0	0	0.1174	0.6502	0.2812	2.3273
	15	0	0	0.3209	10.4285	19.4035	101.6674
	16	0	0	0.2731	1.5136	3.6230	5.3125
	18	0	1.0602	1.9212	17.4996	29.2220	108.7876
合计	0	1.4189	5.6116	51.9686	109.976	339.0425	
300MW 风电场	1	0	0	0	2.9628	8.7929	16.6819
	2	0	0	0.0450	2.3865	5.3615	18.2793
	7	0	0.1104	0.1748	3.1908	7.5792	17.2329
	8	0	0	0	0.0912	0.1640	3.1383
	13	0	0.6166	1.1117	9.7813	15.2877	8.0003
	14	0	0	0	0.9838	1.3797	3.1666
	15	0	0.4048	0.4423	10.5878	78.9741	140.5438
	16	0	0.0212	0.3052	3.4301	3.1119	8.3335
	18	0	0	6.6603	25.1969	76.2409	163.8418
合计	0	1.1530	8.7393	59.0002	196.8929	380.5553	

Table 3. System operating state probability table (unit: %)
表 3. 系统运行状态概率表(单位: %)

状态	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	
无风电场	安全	97.0482	94.2089	91.3982	88.6690	86.0844	83.5484
	警戒	2.9271	5.7262	8.4907	10.4560	12.7941	15.0792
	临界	0.0247	0.0634	0.1022	0.7475	0.9215	0.6240
	事故	0	0.0015	0.0089	0.1275	0.2000	0.7484
300 MW	安全	97.0777	94.2367	91.4267	88.7782	86.2407	83.6329
	警戒	2.8999	5.6498	8.4013	10.5983	13.0008	15.3742
	临界	0.0224	0.1111	0.1627	0.4973	0.4703	0.5440
	事故	0	0.0024	0.0093	0.1262	0.2882	0.4489

5. 小结

本文从风电场与大电网两个方面详细讨论了含大规模风电场的电力系统的风险源,在此基础上,基于

运行风险评估框架理论体系,建立了相应的运行风险评估指标体系,分别从局部级和系统级两个层面反映系统的短期运行风险水平。然后,基于 IEEE-RTS79

验证上述所建评估框架理论体系的正确性。本算例还可以从风电场的装机容量与接入方案的选择两方面做案例分析, 对大电网运行风险进行更深入的评估。

参考文献 (References)

- [1] 肖创英, 汪宁勃, 陆晶, 等 (2010) 甘肃酒泉风电出力特性分析. *电力系统自动化*, **34**, 64-67.
- [2] 侯佑华, 房大中, 齐军, 等 (2010) 大规模风电入网的有功功率波动特性分析及发电计划仿真. *电网技术*, **24**, 60-66.
- [3] 孙荣富, 张涛, 梁吉 (2011) 电网接纳风电能力的评估及应用. *电力系统自动化*, **35**, 70-75.
- [4] 于大洋, 韩学山, 梁军, 等 (2011) 基于NASA地球观测数据库的区域风电功率波动特性分析. *电力系统自动化*, **35**, 77-81.
- [5] 孙春顺, 王耀南, 李欣然 (2009) 水电-风电系统联合运行研究. *太阳能学报*, **30**, 232-236.
- [6] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等 (2010) 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响. *电网技术*, **34**, 152-158.
- [7] 辛颂旭, 白建华, 郭雁珩 (2010) 甘肃酒泉风电特性研究. *能源技术经济*, **22**, 16-21.
- [8] 白雪飞, 王丽宏, 杜荣华 (2010) 风电大规模接入对蒙西电网调峰能力的影响. *内蒙古电力技术*, **28**, 1-3.
- [9] 胡雪松, 孙才行, 刘刃, 等 (2010) 采用飞轮储能的永磁直驱风电机组有功平滑控制策略. *电力系统自动化*, **34**, 79-83.
- [10] Abbey, C. and Joos, G. (2007) Super capacitor energy storage for wind energy applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **43**, 769-776.
- [11] 静铁岩 (2011) 大规模风电并网条件下的电力系统有功功率平衡理论研究. 博士学位论文, 大连理工大学, 大连.
- [12] 白建华, 辛颂旭, 贾德香, 等 (2010) 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究. *电网与清洁能源*, **26**, 14-17.
- [13] Kempton, W. and Tomic, J. (2005) Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, **144**, 280-294.
- [14] Hodge, B.S., Huang, S.S., Pekny, J.F., et al. (2010) The effects of Vehicle-to-Grid systems on wind power integration in California. *Computer Aided Chemical Engineering*, **28**, 1039-1044.
- [15] Feijoo, A.E. and Cidras, J. (2000) Modeling of wind farm in the load flow analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, **15**, 110-115.
- [16] 刘其辉 (2005) 变速恒频风力发电系统运行与控制研究. 博士学位论文, 浙江大学, 杭州.