变速变桨风电机组阵风控制策略

娄尧林[1,2],叶杭冶[2],蔡 旭[1,3],吴晨曦[4]

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 风力发电研究中心,上海 200240;
2. 浙江运达风电股份有限公司 风力发电系统国家重点实验室,浙江 杭州 310012;
3. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室,上海 200240;
4. 杭州电子科技大学 自动化学院,浙江 杭州 310018)

摘要:本着在阵风工况下,变桨控制器提前动作与快速动作的原则,结合变速变桨控制算法基本结构,在基本变桨控制器上增加功率桨距角发电机转速控制环,使桨距角能够在额定功率以下提前动作;在桨距角发电机转速控制环的比例项中增加非线性增益因子,使得变桨控制能在阵风下快速动作。仿真分析与现场测试结果表明,这 2 个阵风控制策略能有效地抑制与减少风电机组发电机由于超速带来的停机,一定程度上可以提高风电场发电量,降低风电机组机械载荷,提高电网稳定性。

关键词:风电机组;极限阵风;超速保护;变桨双积分控制;比例非线性增益因子

中图分类号:TM 614 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.004

0 引言

风电机组在阵风工况下,大面积脱网造成了较为严重的安全问题,给所连接电网带来了冲击。例如 2005 年 1 月,发生在丹麦境内的一个从西海岸到东海岸的大范围阵风,当时最高风速达到 20~25 m/s,导致了近 4000 台风电机组的停机,对电网造成了不小的冲击[1]。阵风是风速与风向在短时间内均发生较大变化的工况,此时风电机组会触发超速保护动作而脱网。大风情况下的超速脱网不仅会增加风电机组机械疲劳载荷,影响机组使用寿命,而且在大风情况下的停机到再次并网运行,受到机组二次并网风速的约束,需要一段时间,这样也会减少风电机组的发电量。因此研究阵风控制策略,抑制或者减少风电机组超速脱网,对于提高风电场发电量、降低风电机组机械载荷、提高电网稳定性有很大的意义。

随着低风速、超低风速风电机组的开发,机组风轮直径不断增大。据统计,1.5 MW 机组的风轮直径从 70 m 发展到 97 m,2.0 MW 机组的风轮直径从 103 m 发展到 121 m[2],机组风轮的惯性增加了近 2 倍。由于风轮的巨大惯性,通常在阵风出现 1~2 s 后,风轮转速才发生变化,滞后系统容易引起飞车[3]。机组发生风轮超速的另外一个因素是,由于桨叶气动的非线性特点,单一控制器或单一增益的控制器已不能满足控制性能要求,通常做法是根据桨距角[4-5]或者风速[6]来设计增益调节的变桨控制参数,桨距角或风速越大,则增益越小,这样虽然避免了桨距角的调节时间过长,但在阵风工况下,风速急剧上升时,桨距角动作比较缓慢,风轮惯性较大,风轮容易发生超速。

已有文献对抑制风轮超速进行了研究,文献[7]简化了传动链模型及尾流模型,基于静态的功率-风速关系,预估出风轮有效风速作为控制器的前馈信号,进行提前变桨动作,但没有考虑偏航误差、风轮与塔架的动态特性;文献[8]基于测量桨叶根部挥舞与摆振方向的弯矩,通过非线性观测器,预估出有效风速及入流角,并在此基础上识别极限事件模式,来进行快速变桨,有效降低了风轮转速。但在目前运行的风电机组中,在桨叶根部贴应变片并不常见。文献[9-10]基于安装在机舱上的雷达测风仪,检测到风轮前的风速,处理后引入作为控制器的前馈信号,有效地降低了机组的载荷,同时也有效抑制了风轮超速问题,但雷达测风仪目前还处于试验阶段,成本较高,不适合工程批量应用。

本文提出的阵风控制策略,本着在阵风工况下,变桨提前动作与快速动作的原则,结合变速变桨控制算法基本结构,在变桨控制器 PC(Pitch Controller)上增加功率桨距角发电机转速控制环 PPGSL(Power Pitch Generator Speed Loop),使变桨在额定功率以前提前动作;在变桨比例项中增加非线性增益因子 NLGF(NonLinear Gain Factor),使得变桨能够快速动作,从而有效抑制在阵风工况下风轮转速超调。通过对一个低风速大叶轮的 2.0 MW 机组在额定风速附近与额定风速以上阵风工况的仿真分析,及控制策略的现场验证,表明该阵风控制策略能有效抑制

收稿日期:2015-08-03;**修回日期**:2016-07-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407052);风力发电系统国家重点实验室开放课题资助项目(2014001)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407052) and the Open Project Program of State Key Laboratory of Wind Power System(2014001)

风轮超速,减少由于停机带来的发电量损失,而又不增加机组疲劳载荷。

1　风电机组风轮超速机理分析

1.1　风电机组控制器基本原理

风电机组控制器由转矩控制器 TC(Torque Controller)与 PC 两部分组成,如图 1 所示。图中,ω_{rate} 为额定发电机转速;β_{ref} 为桨距角给定;$\beta_{max\text{-}min}$ 为最大与最小桨距角限制值;P_{rate} 为风电机组额定功率;ω_{set} 为发电机设定转速;ω_g 为当前发电机转速;T_g 为比例积分 PI(Proportional Integral)控制器输出的发电机给定转矩;$T_{max\text{-}min}$ 为最大与最小转矩限制值。

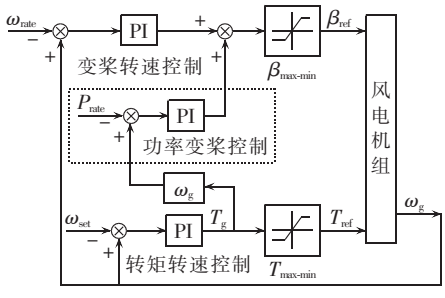


图 1 转矩控制与变桨控制基本原理框图
Fig.1 Schematic diagram of torque control and pitch control

TC 的作用是发电机转速调节,转矩–转速的控制轨迹通常如图 2 所示,其中 AB 为直线,BC 为二次曲线,CE 为直线,DEF 为反比例曲线。图中,ω_{min} 为最小发电机转速,T_{rate} 为额定发电机转矩,k_{opt} 为最优模态增益系数。在额定风速以下,即在图 2 的 E 点以前,进行最大功率点跟踪控制,在额定风速以上,进行恒功率控制[11-13]。TC 通常以发电机转速差作为控制输入、发电机给定转矩作为输出的 PI 控制器来实现。PI 控制器输出,即发电机给定转矩需根据当前发电机转速设定上限值与下限值,从而实现最大风能捕获与恒功率控制。在恒功率控制阶段,可以通过在基本转矩的基础上,加上纹波转矩,以抑制传动链扭振,减少传动链疲劳载荷[14]。

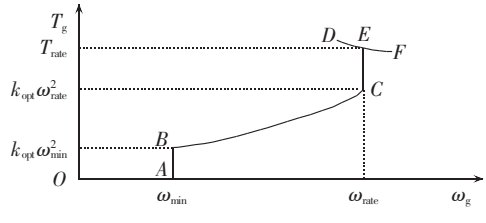


图 2 变速变桨风电机组转矩–转速图
Fig.2 Curve of torque vs. speed for variable speed variable pitch wind turbine

PC 在额定风速以上起作用,其目的也是调节发电机转速。PC 通常设计为以发电机转速差作为输入[15]、桨距角作为输出的 PI 控制器[16-17]。由于桨叶气动的非线性特点,PC 的比例系数与积分时间常数是变增益的,可以根据预先设定的桨距角与其对应关系获得[18]。

由于 TC 和 PC 都能控制转速在同一个设定点,所以 2 个控制器需进行解耦控制,满足以下要求:当转矩在额定点以下时给定的桨距角要保持在最优桨距角 β_{fine};当桨距角大于最优桨距角时,给定转矩要维持在额定转矩。

1.2　阵风工况下机组超速情况分析

当机组在额定风速以下(如低于额定风速 1 m/s)运行,遭遇了阵风,风电机组的发电机转速容易超过 1.1 倍的保护限值[19],导致机组超速停机。这时为了防止在功率未达到额定功率而变桨动作导致功率损失,往往把 TC 过渡到 PC 的条件设计为发电机转速超过额定转速而且机组的功率达到额定值。因此在风速迅速上升的工况下,发电机转速急剧上升,但功率没有达到额定值,如图 2 的 E 点之前,变桨没有动作。但当功率达到额定值时,转速已经很高,此时开始变桨,已不能及时有效地抑制发电机超速。

当机组在额定风速以上运行时,风电机组运行在 PC 阶段,一是由于风轮的巨大惯性,从阵风发生到发电机转速变化有 1 s 左右的滞后,二是由于桨叶气动的非线性特点,在设计 PC 时,桨叶角度越大,控制器的增益越小,这就导致风速急剧上升的情况下,桨叶回调速率比较慢,不能很好地抑制风轮超速。

2　抑制阵风的控制策略

针对额定风速以下与额定风速以上 2 种阵风超速的情况,结合变速变桨控制算法基本结构,设计了阵风控制策略:在 PC 上增加 PPGSL,使变桨在额定风速以下提前动作;在变桨比例项中增加 NLGF,使得变桨能快速动作。

2.1　阵风下提前变桨控制策略

在 PC 上增加 PPGSL,如图 1 虚线框所示,使桨距角给定值由两部分组成,分别是由桨距角发电机转速 PGSL(Pitch Generator Speed Loop)PI 控制器给定和 PPGSL 的 PI 控制器给定,PC 由单个 PI 控制器变成双 PI 控制器,PPGSL 的作用是当风速迅速上升时,桨距角可以提前动作,以阻止转矩达到上限时的瞬间过速[14]。

PPGSL 以实际计算功率与额定功率之差作为输入、桨距角作为输出的 PI 控制器,在这里实际计算功率为 TC 输出的原始转矩与发电机转速的乘积,如图 3 所示。在阵风作用下,发电机转速快速上升,超过额定发电机转速值,虽然给定转矩值还没有达到额定转矩值,但增长很快,此时功率控制环比例项的作用大于积分项,使得变桨在额定风速下提前变桨,

而积分项的作用是功率在额定值以下时,桨距角增量 $\Delta\beta_2$ 输出为负值,此时即使桨距角增量 $\Delta\beta_1$ 输出为正值,但总的桨距角增量 $\Delta\beta$ 输出为负值,把桨距角限制在最优桨距角。

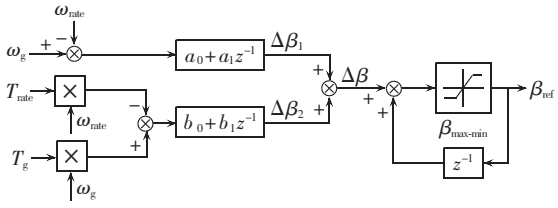


图 3 双 PI 控制器结构框图

Fig.3 Block diagram of double PI controller

图 3 中,$\Delta\beta_1$ 为 PGSL 输出的桨距角增量;$\Delta\beta_2$ 为 PPGSL 输出的桨距角增量;a_0、a_1、b_0、b_1 为 PI 控制器数值离散化后的系数,$a_0=K_I T_S/2+K_P$,$a_1=K_I T_S/2-K_P$,$b_0=K_{IQ} T_S/2+K_{PQ}$,$b_1=K_{IQ} T_S/2-K_{PQ}$,其中 T_S 为采样时间,K_I 和 K_P 分别为 PGSL 的积分与比例系数,K_{IQ} 和 K_{PQ} 分别为 PPGSL 的积分与比例系数。

2.2 阵风下快速变桨控制策略

针对额定风速以上的阵风工况,发电机转速已经远大于额定发电机转速,而且偏差还在不断增加,但此时 PC 的比例增益却随着桨距角的增加在减少,这样导致了风轮转速的增加。

针对以上情况,对变桨的比例增益,设计增加一个非线性附加项,通过加快回调桨距角,来抑制风轮超速。设计原则是在转速偏差较大而且偏差还在继续增加的情况下,对 PGSL 的比例项乘以一个数值大于 1 的增益因子,达到快速变桨,尽快达到最大变桨速率回调桨距角、抑制风轮超速的目的。增益因子的数值选取,要遵循在正常湍流风下不起作用、在极限阵风情况下发挥迅速作用的原则[20]。

图 4 中,$\Delta\omega$ 为计算的转速偏差;$\frac{d(\cdot)}{dt}$ 表示对转速偏差求微分运算;Lookup_table 为预设的查找表,其中 KP_K 为比例增益因子,KP_xxdot 为发电机转速偏差与其变化率的乘积。

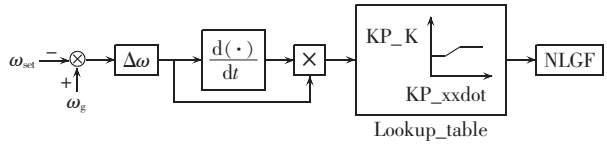


图 4 变桨比例项非线性增益因子

Fig.4 NLGF added to proportional

2.3 不对称变桨速率

针对一些特殊的阵风工况,风速先急剧下降,然后快速爬坡上升,这时桨距角先减小再上升,由于变桨滞后于风速的原因,风速已经进入上升阶段,但桨距角还在减小,这种工况下,采用不对称变桨速率,即开桨速率小于顺桨速率,通过减小桨距角回调的行程,一定程度上也可以抑制风轮超速。

3 仿真分析

根据风电机组设计标准[19],阵风有风速与风向变化特性,本文为了分析机组的超速机理,仅考虑其风速变化,选取风速单边上升的极限相干阵风 ECG (Extreme Coherent Gust)与风速先上升再下降的极限阵风 EOG(Extreme Operating Gust),也即墨西哥草帽风。

仿真的风电机组为 2.0 MW 变速变桨双馈机组,机组主要参数如下:风电机组类型为水平轴,上风向,额定功率为 2000 kW,切入风速为 3 m/s,额定风速为 9.1 m/s,切出风速为 20 m/s,叶片数为 3,风轮直径为 115 m,塔架高度为 80 m,控制方式为变速变桨,齿轮箱速比为 130.16,发电机类型为双馈发电机,变桨速率为 -6~6°/s,并网发电机转速为 1100 r/min,额定发电机转速为 1800 r/min,通过 Bladed 风电机组设计软件[21]进行双馈机组的变桨控制特性研究和载荷计算。

3.1 阵风下提前变桨控制策略效果验证

本文中 PPGSL 的比例参数取 2×10^{-7} rad/s,积分参数取 1×10^{-7} rad/s。一般该比例参数可以由 PGSL 的比例系数除以 TC 的比例系数与额定发电机转速的积得到,而积分时间常数通常取 1~2 s。

仿真用的阵风取 EOG,起始风速为 8.8 m/s,阵风幅值为 9.6 m,持续时间为 10 s。从图 5 可以看出,在使用了功率变桨环后,PC 在第 15 s 之前,即功率未达到额定功率 2000 kW 就开始动作,比原先的控制器提前变桨约 1 s,从而把发电机最大转速由 2020 r/min(大于额定转速的 1.1 倍)降低到 1970 r/min 左右,效果明显。由于提前变桨,从功率曲线

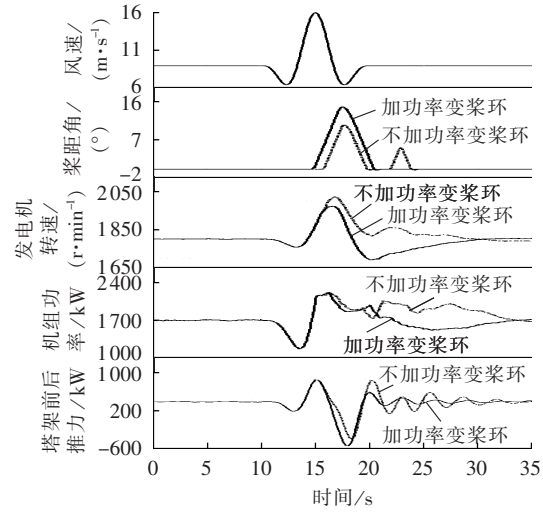


图 5 额定风速附近增加 PPGSL 的阵风控制效果

Fig.5 Enhancement of gust control effect of PPGSL around rate wind speed

上可以看出,稍微损失了一些功率,而塔架前后的推力没有明显增加,这种工况下,抑制风电机组超速引起的停机是主要控制目的。这说明该功率辅助环不但能平滑过渡于转矩控制与变桨环之间,而且还能有效避免风电机组在瞬态的风速变化过程中过转速、过功率等可能会使机组出现极限载荷的情况。

3.2　阵风下快速变桨控制策略效果验证

本文取变桨 NLGF 参数时,选用 3 个点的查找表,如图 6 所示。选取参数的原则为:在正常运行湍流风工况下,参数不起作用或作用较弱,即参数数值在 1 附近;在阵风工况下,发电机转速较高,而且转速有继续增加的趋势,则参数值取较大值,一般取 2~3,具体跟桨叶翼形有一定关系。图 6 中 3 个转折点坐标为:(0,1)、(30,1.35)、(100,2.5)。

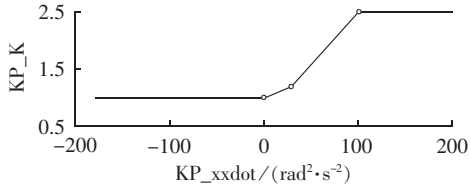


图 6　变桨 NLGF 参数选取方法
Fig.6　Setting of NLGF

仿真取 ECG,起始风速为 9.3 m/s,阵风变化幅值为 11 m,持续时间为 8 s。从图 7 可以看出,在阵风出现后,由于使用了新的控制策略,变桨动作速率比原先增加了 1°/s 左右,变桨系统迅速加速到最大变桨速率进行变桨控制;而同一时刻的桨距角,也比原先增大了 2° 左右,从而把发电机最大转速由 2050 r/min(大于额定转速的 1.1 倍)降低到 1 960 r/min 左右,效果明显。该策略对机组的输出功率影响不大,但由于快速变桨,塔架前后的推力稍微有所增加,这种工况下,主要控制目的还是抑制风电机组超速。这说明变桨比例非线性增益项能使变桨快速动作,有效减少风电机组在瞬态的风速变化过程中出现的过转速情况。

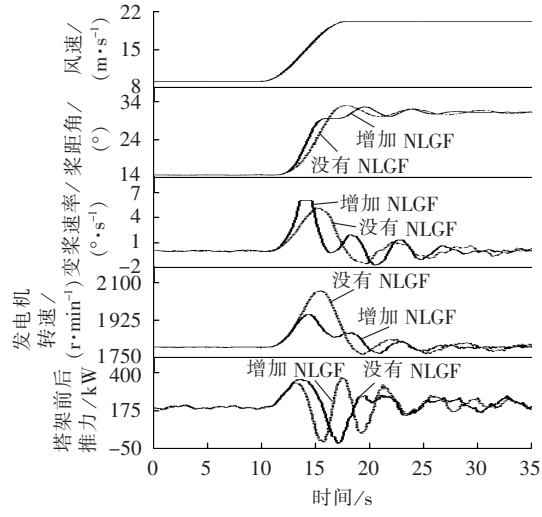


图 7　增加 NLGF 的阵风控制效果
Fig.7　Enhanced gust control effect by NLGF

4　控制策略现场测试验证

在测试风电场选取了 4 台风电机组,分成 2 组进行控制策略验证,每组的 2 台机组在机位上相邻,地形上相似。控制器均升级了控制软件,一组对比 PPGSL 效果,另一组对比 NLGF 效果。

在现场测试的 3 个月时间里,没有采用阵风控制策略的机组,发生超速停机 17 次,而增加阵风策略的机组,停机次数减少到 4 次,有效减少了停机次数。停机的原因是由于风速变化幅度过大,而变桨动作速率是有限的。经过现场测试验证,采用阵风控制策略后,能有效抑制机组过转速,避免不必要的脱网停机。

图 8、图 9 为控制器记录的一次极限阵风工况,

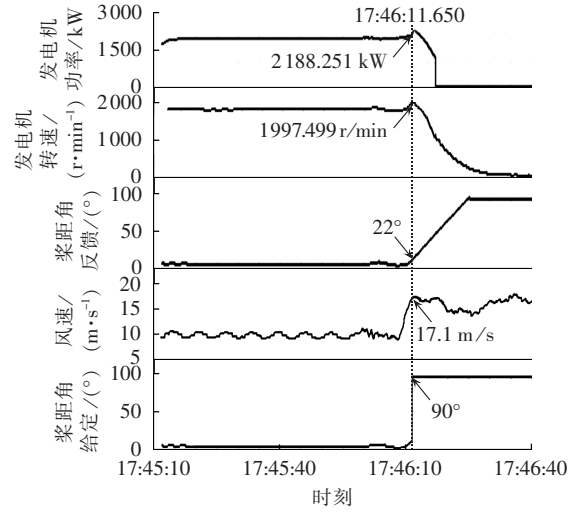


图 8　风电机组在阵风工况下超速停机的录波图
Fig.8　Shutdown of wind turbine due to over-speed in gust condition

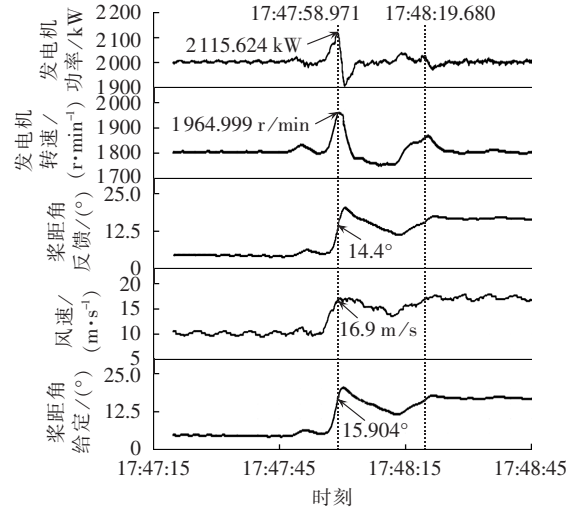


图 9　风电机组在阵风工况下正常运行的录波图
Fig.9　Normal operation of wind turbine in gust condition

风速在5 s内从10 m/s增加到17 m/s左右,风轮转速达到1 980 r/min,触发软件过转速保护后脱网停机。而采用变桨NLGF的风电机组,风速情况基本类似,则成功地应对了该次阵风,风电机组继续运行发电。

5 结论

在分析变速变桨风电机组传统PC策略的基础上,针对阵风工况下机组容易发生风轮超速引起停机的问题,本着在阵风工况下变桨提前动作与快速动作的原则,结合变速变桨控制算法基本结构,在PC上增加PPGSL,使变桨在额定风速以下提前动作;在变桨比例项中增加NLGF,使得变桨能快速动作。

Bladed软件仿真与现场测试结果表明,上述控制策略能有效地改善风电机组在阵风工况下的动态响应特性,降低风电机组机械载荷,增加发电量,提高电网的稳定性。

参考文献:

[1] HAANPÄÄ S,LEHTONEN S,PELTONEN L,et al. Impacts of winter storm Gudrun of 7th-9th January 2005 and measures taken in Baltic Sea Region[R]. Helsinki,Finland:Centre for Urban and Regional Research,2006.

[2] 赵靓. 1.5 MW、2 MW风电机组风轮直径发展趋势[J]. 风能,2014,25(5):34-37.
ZHAO Liang. Rotor diameter development trends of 1.5 MW and 2 MW wind turbine[J]. Wind Energy,2014,25(5):34-37.

[3] 叶杭冶. 风力发电机组监测与控制[M]. 北京:机械工业出版社,2011:123-125.

[4] 王江. 带增益调度的风力发电变桨距控制研究[J]. 电器时代,2009,15(2):52-53.
WANG Jiang. New control method of variable pitch system with variable gain PID controller[J]. Electric Area,2009,15(2):52-53.

[5] IANCHI F D,DE BATTISTA H,MANTZ R J. Wind turbine control systems-principles,modelling and gain scheduling design[M]. Berlin,Germany:Springer-Verlag,2007.

[6] 郭鹏. 结合风轮气动特性分区的多PID切换变桨距控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(增刊):153-158.
GUO Peng. Multiple PID switching variable pitch control strategy based on divided scope of rotor aerodynamic characteristic[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(Supplement):153-158.

[7] VANDER HOOFT E L,VAN ENGELEN T G. Estimated wind speed feed forward control for wind turbine operation optimization[R]. Westerduinweg,Netherlands:Energy Research Center of the Netherlands(ECN),2004.

[8] KANEV S,VAN ENGELEN T G. Wind turbine extreme gust control[J]. Wind Energy,2010,13(1):18-35.

[9] WANG N,JOHNSON K E,WRIGHT A D. FX-RLS-based feedforward control for LIDAR-enabled wind turbine load mitigation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2012,20(5):1212-1222.

[10] BOSSANYI E A. Un-freezing the turbulence:application to LiDAR-assisted wind turbine control[J]. Renewable Power Generation,2013,7(4):321-329.

[11] WOUTERS D A J,VAN ENGELEN T G. Modern wind turbine controller design[R]. Westerduinweg,Netherlands:Energy Research Center of the Netherlands(ECN),2009.

[12] VANDER HOOFT E L,VAN ENGELEN T G,SCHAAK P,et al. Design tool for wind turbine control algorithms[R]. Westerduinweg,Netherlands:Energy Research Center of the Netherlands(ECN),2006.

[13] VAN ENGELEN T G,VANDER HOOFTET E L. Development of wind turbine control algorithms for industrial use[R]. Westerduinweg,Netherlands:Energy Research Center of the Netherlands(ECN),2009.

[14] 林志明,潘东浩,王贵子,等. 双馈式变速变桨风力发电机组的转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(32):118-124.
LIN Zhiming,PAN Donghao,WANG Guizi,et al. Torque control of doubly-fed variable speed variable pitch wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(32):118-124.

[15] 张永斌,袁海文. 双馈风电机组低电压穿越主控系统控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):106-112.
ZHANG Yongbin,YUAN Haiwen. Control strategy of DFIG main control system during low voltage ride through[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):106-112.

[16] 朱瑛,程明,花为,等. 基于2种变速变桨距方法的双功率流风力发电系统功率控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):123-129.
ZHU Ying,CHENG Ming,HUA Wei,et al. Power control of dual power flow wind energy conversion system based on two variable-speed variable-pitch control methods[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):123-129.

[17] 王斌,吴焱,丁宏,等. 变速变桨距风电机组的高风速变桨距控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):81-83.
WANG Bin,WU Yan,DING Hong,et al. Variable-pitch control of wind turbine at high wind speed[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):81-83.

[18] BOSSANYI E A. The design of closed loop controllers for wind turbines[J]. Wind Energy,2000,18(3):149-163.

[19] IEC. Wind turbine:part 1 design requirements:IEC61400-1-2005[S]. Geneva,Switzerland:International Electrotechnical Commission,2005.

[20] BOSSANYI E A. Controller for 5 MW reference turbine[R]. Bristol,England:Garrad Hassan and Partners Limited,2009.

[21] BOSSANYI E A. GH bladed user manual[R]. Bristol,England:Garrad Hassan and Partners Limited,2009.

作者简介:



娄尧林(1977—),男,浙江绍兴人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为风电机组整机控制研究、风电机组电网接入(**E-mail**:louyl@chinawindey.com)。

(下转第62页 continued on page 62)

(10):34-37.
[19] 宋晓通,谭震宇. 大型发输电组合系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术,2007,33(7):191-194.
SONG Xiaotong,TAN Zhenyu. Methodology for reliability evaluation of bulk composite generation-transmission system[J]. High Voltage Engineering,2007,33(7):191-194.
[20] BILLINTON R,KUMAR S,CHOWDHURY N,et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1989,4(3):1238-1244.

作者简介:



杨晓萍

杨晓萍(1964—),女,陕西蒲城人,教授,博士,研究方向为电力系统分析、规划与运行控制(**E-mail**:yangxiaoping@xaut.edu.cn);

王 媛(1991—),女,陕西周至人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与规划(**E-mail**:578101618@qq.com)。

Transmission system reliability evaluation based on one direction S-rough set theory

YANG Xiaoping[1],WANG Yuan[1],WANG Ming[1,2]

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering,Xi'an University of Technology,Xi'an 710048,China;2. Guodian Nanjing Automation Go.,Ltd.,Nanjing 210032,China)

Abstract: A method of transmission system reliability evaluation based on the one direction S-rough law and F-decomposing law is proposed to study the effects of complex weather on the reliability of transmission system. The one direction S-rough law is applied to deal with the uncertainty of failure rate and weather. A transmission line reliability model based on complex weather factors is established and the non-sequential Monte Carlo method is applied to evaluate the system reliability. F-decomposing law is applied to develop the interference indices and the effects of different weather combinations on them are analyzed. Analysis for IEEE 30-bus power generation and transmission system shows that,the component reliability parameter model with the consideration of weather factors predicts the transmission line failure rate accurately and the proposed reliability evaluation method based on the objective data(yearly days of different weather conditions) is immune to the influence of human subjective factors,which reveals the influencing law of weather factors on the system reliability and makes the evaluation results more objective.

Key words: reliability evaluation; one direction S-rough set; F-decomposing law; line failure rate; weather factors

(上接第28页 continued from page 28)

Extreme gust control strategy for variable speed variable pitch wind turbine

LOU Yaolin[1,2],YE Hangye[2],CAI Xu[1,3],WU Chenxi[4]

(1. Wind Power Research Center,School of Electrical Information and Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;2. State Key Laboratory of Wind Power System,Zhejiang Windey Co.,Ltd.,Hangzhou 310012,China;3. State Key Laboratory of Ocean Engineering,School of Naval Architecture,Ocean and Civil Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;4. School of Automation,Hangzhou Dianzi University,Hangzhou 310018,China)

Abstract: According to the advance and quick action principle of pitch controller in the gust condition and based on the basic structure of variable speed variable pitch control algorithm,a PPGSL(Power Pitch Generator Speed Loop) is added to the basic pitch controller to let the pitch act in advance below the rated power while a nonlinear gain factor is added to the proportional of PPGSL to make the pitch control quick in the gust condition. The results of simulation and field test show that,the proposed two gust control strategies can effectively suppress and reduce the shutdown of wind turbine due to the over-speed,enhance the power output of wind farm to some extent,lower the mechanical load and improve grid stability.

Key words: wind turbines; extreme gust; over-speed protection; double integral pitch controller; proportional nonlinear gain factor