

〔风力发电〕

海上风力发电机组安全系统的设计及性能评估

文/哈电风能有限公司 郭燕萍 黄凌翔 黄 正

参照欧盟的机械电气安全标准 ISO 13849-1，结合陆上与近海机型开发与运行经验，设计了一套适用于海上风力发电机组的安全系统，并对安全系统的性能等级 (PL) 进行计算与评估，结果表明此设计能满足海上风电机组的安全功能要求，极大地提高了机组安全性与可靠性。

近年来，随着海上风电行业的不断扩张，传统的近海风电场的发展空间日渐局促，加大深远海海上风电开发力度是必然趋势。离岸更远、环境更为严苛，风电机组的安装和维护更为艰难。如何优化海上风力发电机组的设计方案，提高机组安全性和可靠性，成为海上风力发电机组电气设计的重中之重。

海上风力发电机组的运行管理一般由控制系统执行，其程序逻辑应保持风力发电机组在规定的条件下能有效、安全地运行。当控制系统不能使机组保持在正常运行范围内，或超过有关安全的极限值后，则由安全系统执行安全方案。安全系统的优先级高于控制系统，是风力发电机组最为关键也是最后一道保护措施，其有效性和可靠性直接关系到风力发电机组的安全、稳定和长周期可靠运行。

本文遵循 ISO 13849-1 标准规定的控制系统安全相关部件 (SRP/CS) 的迭代设计过程，确定海上风力发电机组需要实现的每种安全功能的所需性能等级 (PL_r)，并结合陆上风力机组的设计与运行

经验，搭建一套以安全 PLC 为核心的海上风力发电机组安全系统，在充分考虑类别 (Cat.)、平均危险失效间隔时间 (MTTF_D)、诊断覆盖率 (DC)、共因失效 (CCF) 和系统性失效等因素的情况下，对此系统各个安全功能的性能等级 PL 进行评估与验证。

安全功能要求

海上风力发电机组的内部或外部发生故障，或监控的参数超过极限值而出现危险情况，或控制系统失效，海上风力发电机组不能保持在正常运行范围内，则应启动安全系统，使海上风力发电机组维持在安全状态。

安全系统设计的第一步是清晰地了解和评估与过程相联系的危险和风险，并识别出由 SRP/CS 执行的安全功能。参考中国船级社 2012 年发布的海上风力发电机组认证规范对安全保护功能的要求，结合风力发电机组的设计与运行经验，提出海上风力发电机组安全系统应提供的安全功能 (SF)。

(1) 安全有关停止功能

在机组通过安全防护装置（如传感器）检测到风轮转速超过限值、扭缆超过限值、过度振动及控制系统失效等信号时，安全系统起动机组紧急制动进入停止状态。安全系统触发后，必须保持安全停止状态，直到接收到有效复位信号。

(2) 复位功能

复位功能包括本地手动复位、上电复位和远程手动复位。本地手动复位仅在安全故障清除后才有效；安全系统在无故障触发的情况下可实现上电自动复位。考虑到海上机组维护不便的情况，系统应增加远程手动复位功能，由具备远程复位操作权限的工程师操作。

(3) 启动和重启功能

只有危险状况不可能存在的情况下才允许安全系统自动重启。

(4) 防止意外启动

安全系统触发后，禁止因电网中断后重新接通而引起的系统自发重启。

(5) 急停功能

急停指令执行后急停装置（如急停按钮）的有效动作已停止，应维持该指令的作用直到急停装置复位为止。

确定所需性能等级（PL_r）

性能等级（PL）定义为每小时危险失效的概率（PFH_D）。PL 分为 5 级，从最低 PL=a 到最高 PL=e，各级对应一个明确的 PFH_D 范围见表 1。

表 1 性能等级（PL）

PL	平均每小时危险失效概率 (PFH _D) 1/h
a	$\geq 10^{-5} \sim < 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6} \sim < 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6} \sim < 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7} \sim < 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8} \sim < 10^{-7}$

对于识别出的安全功能，根据风险图解法（如图 1 所示）确定下列风险参数：

1) 伤害的严重度，S=S2，风轮超速、扭缆超

限、振动超限、控制系统失效和急停等任一故障触发，都可能引起机组飞车、倒塌或火灾等严重伤害。

2) 暴露于危险的频率和/或时间，F=F1，正常情况下，风机控制系统在超速、扭缆等信号在达到超限之前做出有效控制，只有特定情况下才出现此类风险，因此很少发生。

3) 避免危险的可能性，P=P2，海上机组出现倒塌或火灾时，几乎不可能避免。

通过这些参数可逐步确定海上风力发电机组安全系统的所需安全等级 PL_r=d。

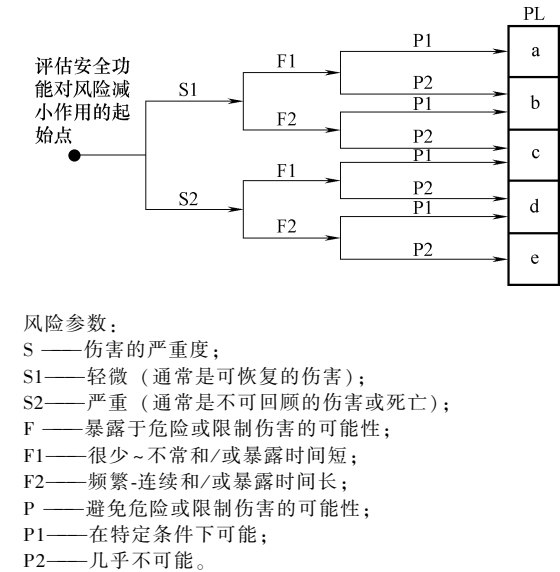


图 1 用于确定安全功能要求的 PL_r 的风险图

安全系统的设计

1. 陆上机组安全系统设计方案

现有陆上风力发电机组安全系统一般采用多个安全继电器作为主逻辑器件来执行安全控制功能，如图 2 所示的陆上机组安全系统分为急停链、机舱安全链和变桨安全链三个级别。主控柜急停按钮、机舱急停按钮和变流器急停按钮串联后接入急停链安全继电器的输入端，任一急停按钮拍下后触发急停链动作，切断控制系统电源，变流器执行急停程序，变桨系统通过后备电源执行紧急收桨；急停链触发、振动超限、扭缆超限、控制系统看门狗丢失及风轮超速中任一条件均可触发机舱安全链，机舱

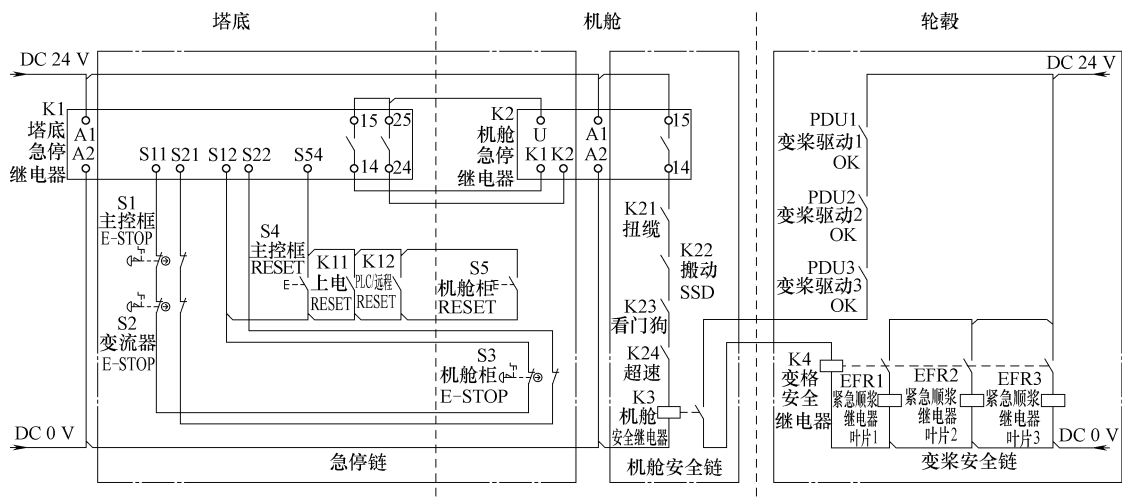


图2 陆上风力发电机组安全系统原理图

安全链触发或任一变桨驱动故障可触发变桨安全链，变桨系统通过市电执行收桨命令，机组进入安全状态。

陆上机组安全系统可实现基本的安全功能，但仍存在几个方面的问题：

1) 三个级别的安全链输入均采用串联形式接入，无法对每个节点的传感器或急停按钮等安全部件的状态进行有效监控。

2) 塔底、机舱和轮毂三个位置的安全部件之间的连接只能采用硬接线方式，而海上风力机组塔筒高度一般都超过100 m，控制信号远距离传输的可靠性不高。

3) 安全系统的控制逻辑完全由硬件电路实现，不便于控制逻辑的更新。

2. 海上机组安全系统设计方案

海上风力发电机组安全系统原理图如图3所示，由塔底安全PLC主站、机舱安全PLC从站共同执行安全逻辑控制功能，安全系统与控制系统之间可通过PLC背板实现数据交换，但控制系统失效并不影响安全系统独立运行。

塔底安全PLC主站由安全PLC的CPU模块（也称为SLC模块）和光纤通信主模块组成，其中SLC模块负责接收塔底的安全部件状态，执行机组安全系统的逻辑控制功能，并将急停命令输出给变频器，跳闸塔底主断路器。

机舱安全PLC从站包括安全DIO模块和光纤通信从模块，光纤从模块将接入安全DIO模块的机舱安全信号（如机舱急停、振动SSD、风轮超速、扭缆超限和变桨驱动状态信号等）传输至塔底的SLC模块进行逻辑处理，然后将安全控制命令送回机舱。控制系统看门狗信号、PLC/远程复位命令和安全系统状态等与控制系统之间的数据传输均通过PLC背板实现，不需要硬件连接。

任一急停按钮动作触发急停链，变频器进入急停状态，主控400 V电源切断，同时触发机舱安全链；振动超限、扭缆超限、风轮超速或控制系统失效也可触发机舱安全链，扭缆超限时禁止偏航；当机舱安全链触发或任一变桨驱动（PDU）故障时，变桨安全链触发，变桨系统执行紧急收桨。急停链与安全链的控制逻辑程序通过软件编辑并下载至SLC模块中，逻辑程序可本地或远程更新。

相比陆上机组安全系统方案，采用安全PLC的海上机组安全系统可对所有安全部件的状态进行实时监控，塔底与机舱之间采用光纤通信进行信号的传输，与控制系统之间通过背板实现数据交换，大大提高数据交换的可靠性；安全功能的控制逻辑通过软件实现，在不更改硬件连接的情况下可通过更新软件程序对安全系统功能进行更改，极大地提高了系统的适应性与灵活性。

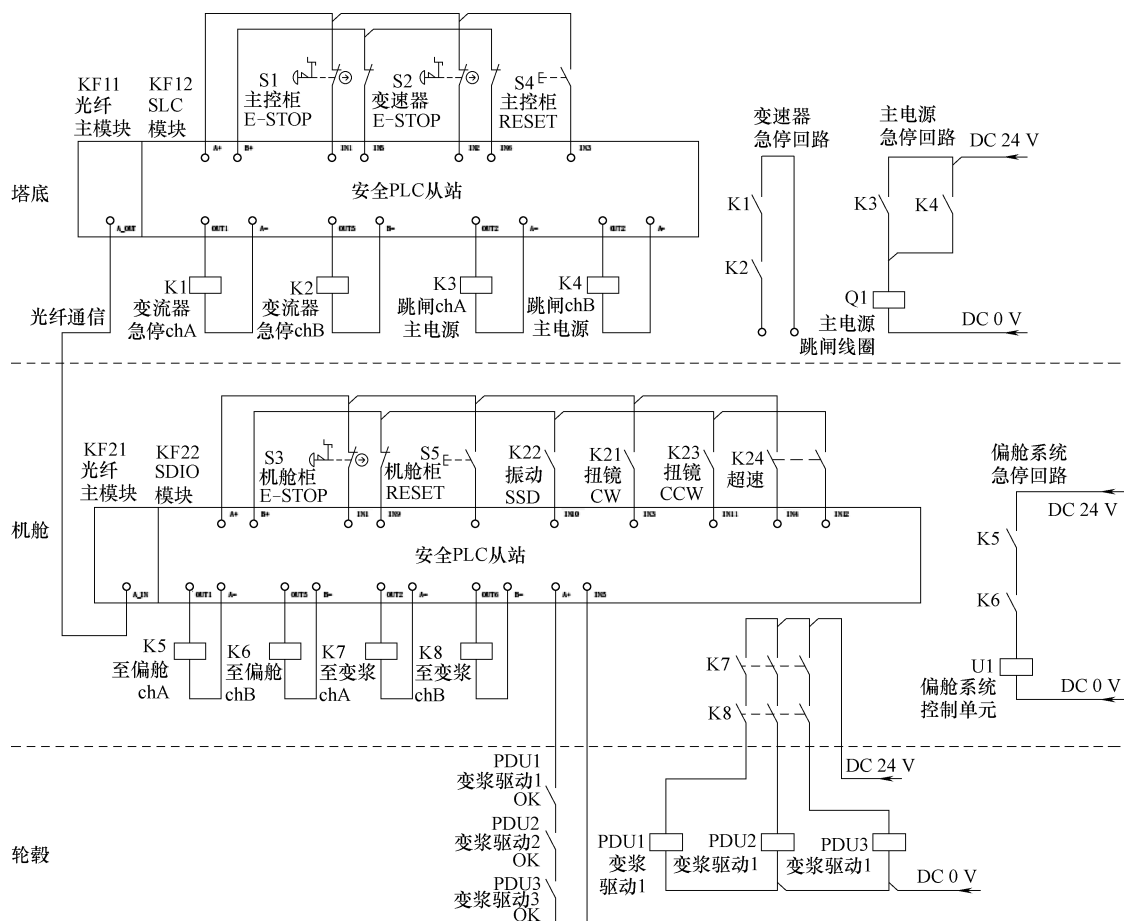


图3 海上风力发电机组安全系统原理图

性能等级（PL）评估

海上风力发电机组安全系统可实现多种安全功能，每种安全功能的PL可通过识别安全功能相关部件，并考虑平均危险失效间隔时间（ $MTTF_D$ ）、平均诊断覆盖率（ DC_{avg} ）、防止共因失效（CCF）的措施、类别（Cat.）、安全相关软件和系统性失效等参数来进行估计与确定。现以“机组振动超限

触发紧急收桨”的安全停止功能为例，给出PL的量化过程。

安全功能“机组振动冲击监测（SSD）超限触发紧急收桨”由4个单独的SRP/CS串联组合执行，其模块图如图4所示。其中SRP/CS₁为输入系统，SRP/CS₂负责逻辑控制，SRP/CS₃和SRP/CS₄为输出系统，组合SRP/CS的PFH_D为单个SRP/CS的PFH_D值之和。

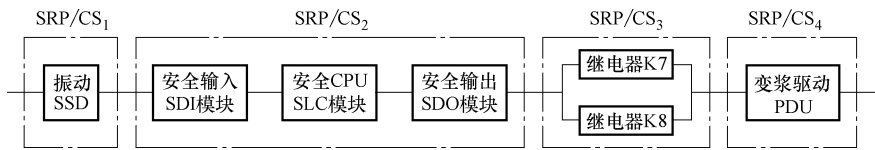


图4 SSD超限触发紧急收桨功能的模块图

SRP/CS₁中振动传感器的PFH_D值由制造商直接提供， $PFH_{D1} = 2.54 \times 10^{-8} / h$ 。

SRP/CS₂由安全模块SDI+SLC+SDO组合而成，其PFH_D值由制造商直接提供， $PFH_{D2} = 1.133 \times 10^{-8} / h$ 。

SRP/CS₃的PFH_D值通过Cat.， $MTTF_D$ 和 DC_{avg} 值来确定。此系统为双通道结构，因此Cat.=3；通过查表（ISO 13849.1—2015表C.1）得出继电器 $B_{100} = 2 \times 10^7$ 次；年平均操作次数

$$n_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600}{t_{cycle}} \quad (1)$$

按每年工作天数 $d_{op} = 340$ 天，每天工作小时数 $h_{op} = 23$ h，平均操作间隔时间 $t_{cycle} = 7\,200$ s，计算可得 $n_{op} = 7\,820$ 周期/年。

由式 (2)

$$MTTF_D = \frac{B_{10D}}{0.1n_{op}} \quad (2)$$

可得每个通道的 $MTTF_D = 25\,575.4$ 年，且两个通道完全相同，取最大 $MTTF_{D3} = 100$ 年；继电器的

状态间接监控，故 $DC_{avg} = 90\%$ 。查表可得 $PFH_{D3} = 4.29 \times 10^{-8}/h$ 。

SRP/CS₄ 中变桨驱动 PDU 的 PFH_D 值由制造商直接提供， $PFH_{D4} = 4 \times 10^{-8}/h$ 。

综上 SSD 触发紧急收桨安全功能总的 $PFH_D = 1.196 \times 10^{-7}/h$ ， $PL = d$ 。

安全功能的 PL 量化与评估在安全评估软件 SISTEMA 中实现起来更为方便快捷，利用软件分别对本文中描述的陆上机型与海上机组安全系统的安全功能进行计算，其结果见表 2。

表 2 风力发电机组安全功能的 PL

序号	功能描述	陆上机组		海上机组	
		$PFH_D(1/h)$	PL	$PFH_D(1/h)$	PL
SF01	急停按钮触发主电源跳闸	3.4×10^{-9}	e	3.3×10^{-9}	e
SF02	急停按钮触发变流器急停	1.2×10^{-6}	c	2.8×10^{-8}	e
SF03	急停按钮触发紧急收桨	1.2×10^{-6}	c	9.1×10^{-8}	e
SF04	SSD 触发紧急收桨	1.2×10^{-6}	c	1.2×10^{-7}	d
SF05	控制系统失效触发紧急收桨	1.2×10^{-6}	c	1.0×10^{-7}	d
SF06	扭缆超限触发紧急收桨	3.7×10^{-7}	d	3.3×10^{-7}	d
SF07	风轮超速触发紧急收桨	2.2×10^{-6}	c	2.3×10^{-7}	d
SF08	变桨驱动故障触发紧急收桨	2.7×10^{-7}	d	1.0×10^{-7}	d

结果表明，相比陆上机组安全系统方案，海上方案中各种安全功能的 PFH_D 值更低，安全性能 PL 更优，且满足安全系统 $PL_e \geq d$ 的设计要求。

结束语

采用安全 PLC 的海上风力发电机组安全系统通过调整安全功能结构、增加安全部件状态实时监控和改进安全系统控制逻辑等措施，使得系统能更有

效地规避单一性失效、系统性失效，提高故障诊断率，降低每种危险状况的风险，从而大大提高海上风电机组的安全性与可靠性。设计紧扣国际国内标准对于海上风电机组安全系统的功能要求，满足欧盟机械电气安全标准 ISO 13849 的设计要求，性能等级达到 d 以上，为海上风电走向深远海提供有力的技术支撑。EA

(收稿日期：2021-04-25)

(上接 58 页)

4 结束语

特变电工上海高压开关有限公司开发了具有自主知识产权的 252 kV GIS 转角母线模块，对其进行研究结果表明：

1) L 型铸铝壳体的应力分布极不均匀，最大应力出现在水平出口和竖直出口相交处的相贯区域。通过变厚度结构设计和大 R 角均匀过渡设计可有效降低相贯区域的应力值，从而有效提高 L 型铸铝壳体的水压爆破值。

2) 通导体侧面长方形孔边缘圆角处的电位

线分布发生结构性的突变，导致该处场强值过高。通过合理的屏蔽结构和长方形孔边缘倒多 R 圆角的优化设计可有效降低该处的最大场强值，从而提高转角母线模块整体绝缘性能，达到显著增加绝缘裕度的目的。

3) 对转角母线模块中 L 型铸造壳体、通流导体等核心部件的设计特点及仿真核算进行探讨和分析，以期对类似母线结构研发设计提供一定借鉴作用。EA

(收稿日期：2021-04-11)