

[风电场]

风电场综合厂用电率偏高分析及改进

文/龚家彦 施毅乐
中广核新能源浙江分公司

综合厂用电率是风电场一项重要的经营运行指标。通过风电场的集电线路损耗电量、主变压器及母线损耗电量、站用电量及无功设备用电量等运行数据，对本风电场厂用电率偏高情况进行数据分析。旨在找出本风电场厂用电率偏高的原因并采取可行性措施，以提高风电场节能管理水平，增加风电场经济效益。

风电场综合厂用电率（以下简称厂用电率）是风电场一项重要的经营运行指标。降低风电场生产运行的电能损耗和综合厂用电率，在当下节能减排的大环境下，综合厂用电率的降低对风电场可持续发展有着重大意义。风电场在保证安全生产的前提下，适当采取一些措施降低综合厂用电率，提高风电场的经济效益。

基本情况

某风电场位于钱塘江北岸海宁尖山新区。风场安装25台单机容量为2 MW的风力发电机组，沿钱塘江堤岸带状排开，总装机容量50 MW。风电场风机均运行正常，近三年风电场综合厂用电率与区域场站对比处于一个较高水平，对本风电场的用电量和损耗电量进行分析，寻找综合厂用电率偏高原因并提出降低综合厂用电率的措施。

风电场用电量分析

通过对2021年1~12月风电场场内35 kV集电线路损耗电量、主变压器及母线损耗电量、无功补偿设备用电量和站用电量的数据进行分析，清晰地得到损耗量主要以集电线路损耗电量为主，主变压器及母线损耗电量、无功补偿设备用电量和站用电量

的比例较小。数据见表1，风电场厂用电量分析图如图1所示。

表1 某风电场厂用电量数据表

月份	综合厂用电	集电线路损耗电量	主变压器及母线损耗电量	站用电量	无功设备用电量
1	27.95	26.16	0.642	1.148	0
2	26.15	24.44	0.884	0.826	0
3	31.636	27.21	3.53	0.896	0
4	32.86	30.19	1.83	0.84	0
5	30.45	28.2	1.221	1.029	0
6	25.49	22.25	2.015	1.225	0
7	44.2	40.68	3.016	0.504	0
8	28.88	25.94	1.351	1.589	0
9	30.33	25.66	3.809	0.861	0
10	29.18	26.7	1.402	1.078	0
11	30.42	27.36	2.283	0.777	0
12	22.53	20.21	1.438	0.882	0

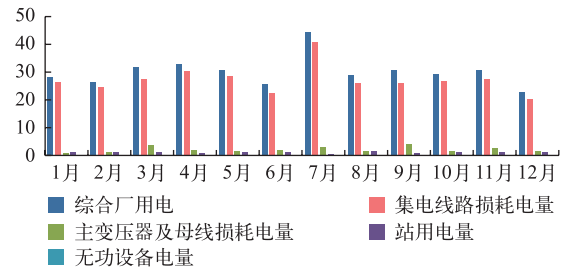


图1 风电场厂用电量分析图

通过比对数据可知，场内集电线路损耗电量占综合厂用电量比重较大，即场内集电线路损耗电量是造成综合厂用电率偏高的主导因素。

风电场损耗分析

1. 主变压器的损耗分析

变压器的损耗=空载损耗+负载损耗，即变压器的铁损+变压器的铜损。电压升高，变压器的铁损会增加；电流升高，变压器的铜损会增加。变压器

的损耗公式为

$$W_{\pm}=P_0T+P_k\beta^2t\tag{1}$$

式中，W为主变压器的电能损耗量，单位为kW·h；P₀为变压器的空载损耗，单位为kW；T为变压器全年运行小时数，单位为h；P_k为变压器的负载损耗，单位为kW；β为变压器的平均负载系数；t为变压器全年电能损耗小时数，单位为h。

主变压器损耗分析见表2。

表2 变压器损耗分析

设备	型号	空载损耗P ₀ /kW	负载损耗P _k /kW	小时数t/h	负荷率β	电能损耗量/(万kW·h)
1#主变压器	SZ1150000/110	34.3	184	1 833.69	0.63	31.37

2021年主变压器电能损耗量为20.88万kW·h，通过理论损耗与实际损耗比对，主变压器的损耗电量正常。同时风电场主变压器有载调压的档位为13档，在满足配电网的要求下，维持一个较高的电压水平，可以降低变压器的损耗，以降低风电场整体的综合厂用电。

2. 35 kV集电线路电力电缆损耗分析

电力电缆的损耗主要表现为热效应，在空载情况下，电流微弱，损耗基本可以忽略。在满载条件下且电缆长度不是足够长，可忽略分布电容，采用理想纯电阻电路模型计算电力电缆损耗。

电力电缆损耗计算公式为

$$W_{\text{电缆损耗}}=I^2R=(nI_0)^2\times\frac{\rho Ls}{S}=\left(n\times\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi}\right)^2\times\frac{\rho Ls}{s}\tag{2}$$

式（2）中，I为单个风机机组中压电缆回路电流，单位为A；n为每根集电电缆通过的负载所包含风机的台数；P为单个风机发电机功率，单位为kW；U为电缆相电压，单位为kV；cosφ为风机发电机功率因数；ρ为电缆导体电阻率；S为电缆导体截面积；L_s为单相电缆总长度。

35 kV集电线路电力电缆损耗分析见表3、表4。

表3、表4中，满载情况下两条35 kV集电线路电力电缆合计损耗功率373.04 kW，即在风电场全场满发的情况下，两条集电线路每小时耗电373.04 kW·h。全年35 kV集电线路电力电缆的电能损耗量为68.403 9万kW·h。

表3 35 kV集电线路电力电缆损耗分析

电缆区间	型号	电阻率/(Ω/km)	长度/m	电阻/Ω	总损耗功率/W
25#~24#	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	410	0.182	593.504
24#~23#	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	380	0.168	2 200.307
23#~22#	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	385	0.171	5 015.832
22#~21#	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	380	0.168	8 801.229
21#~1#	YJLY23-3×150 26/35 kV	0.206	380	0.078	6 394.798
1#~2#	YJLY23-3×150 26/35 kV	0.206	455	0.094	11 025.978
2#~3#	YJLY23-3×150 26/35 kV	0.206	460	0.095	15 172.499
3#~4#	YJLY23-3×240 26/35 kV	0.125	460	0.058	12 024.965
4#~5#	YJLY23-3×240 26/35 kV	0.125	485	0.061	16 046.221
5#~6#	YJLY23-3×240 26/35 kV	0.125	480	0.060	19 605.921
6#~7#	YJLY23-1×240 26/35 kV	0.125	3×600	0.075	29 653.955
7#~升压站	YJLY23-1×240 26/35 kV	0.125	3×450	0.056	26 467.993
海风301线合计				1.265	153 003.202

表4 35 kV集电线路电力电缆损耗分析

电缆区间	型号	电阻率（Ω/km）	长度/m	电阻/欧	总损耗功率/W
20 [#] ~19 [#]	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	390	0.173	564.552
19 [#] ~18 [#]	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	540	0.239	3 126.752
18 [#] ~17 [#]	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	510	0.226	6 644.349
17 [#] ~16 [#]	YJLY23-3×70 26/35 kV	0.443	605	0.268	14 012.482
16 [#] ~15 [#]	YJLY23-3×150 26/35 kV	0.206	385	0.079	6 478.940
15 [#] ~14 [#]	YJLY23-3×150 26/35 kV	0.206	1 380	0.284	33 441.427
14 [#] ~13 [#]	YJLY23-3×150 26/35 kV	0.206	540	0.111	17 811.195
13 [#] ~12 [#]	YJLY23-3×240 26/35 kV	0.125	545	0.068	14 246.969
12 [#] ~11 [#]	YJLY23-3×240 26/35 kV	0.125	680	0.085	22 497.794
11 [#] ~10 [#]	YJLY23-3×240 26/35 kV	0.125	580	0.073	23 690.488
10 [#] ~9 [#]	YJLY23-1×300 26/35 kV	0.100	3×500	0.050	19 769.304
9 [#] ~8 [#]	YJLY23-1×300 26/35 kV	0.100	3×535	0.054	25 174.003
8 [#] ~升压站	YJLY23-1×300 26/35 kV	0.100	5×590	0.059	32 581.773
江风302线合计				1.769	220 040.029
两条线路				3.034	373 043.231

3. 箱式变压器的损耗分析

箱式变压器的损耗分析同理主变压器，查阅宁波天安ZGS-Z.F-2200/35技术资料得知：箱式变压

器空载损耗为2.1 kW，额定负载损耗为21 kW。箱式变压器损耗分析见表5。

表5 箱式变压器损耗分析

设备	型号	空载损耗 P_0 /kW	负载损耗 P_{w} /kW	小时数 t /h	负荷率 β	电能损耗量/（万kW·h）
25台箱式变压器	ZGS-Z.F-2200/35	2.83	23.42	1 833.69	0.63	106.1

4. 风机至箱式变压器低压侧电缆损耗

风机变流器至箱可变压器低压侧电缆单相采用5根铜芯电缆，厂家提供的电缆电阻率为0.077 5 Ω/km，平均每根电缆约20 m，全场合计2.5 km。空载情况下电缆空载电流很小，损耗基本可忽略。满载情况下电缆损耗为

$$P = 2.5 \times 0.0775 \times \left(\frac{2\,000}{\sqrt{3} \times 0.69 \times 5} \right)^2 = 21.7 \text{ kW} \quad (3)$$

5. 风电机组自用电损耗分析

风电场采用2 MW风电机组，风机主要消耗功率统计见表6。

表6 风机机组自用电损耗分析

设备名称	位置	功能	功率	数量	总功率
冷却器风扇	发电机	冷却	4 kW	1	4 kW
齿轮箱油泵电动机	齿轮箱	润滑	8 kW	1	8 kW
齿轮箱散热风扇电动机	齿轮箱	散热	4 kW	1	4 kW
加热风扇	变桨柜	加热	150 W	1	150 W
变桨电动机	变桨	变桨	7.5 kW	3	22.5 kW
偏航电动机	偏航	偏航	3 kW	4	12 kW
机舱照明灯	机舱	照明	40 W	5	200 W
电感风扇	变流器	散热	45 W	4	180 W
配电柜风扇	变流器	散热	64 W	1	64 W
并网柜风扇	变流器	散热	64 W	1	64 W
功率模块风扇	变流器	散热	570 W	2	1.14 kW
其他	-	-	-	-	6 kW

35 kV线路上的总损耗包括35 kV集电线路电力电缆损耗、箱式变压器损耗、风机至箱式变压器低压侧电缆损耗和风电机组自用电损耗。预估25台风机自用电损耗为146.56万kW·h。通过损耗分析,可以发现风电机组自用电的损耗占总损耗的比重较大。结合风电场的实际运行情况,全年小风天占比较高,导致风机部分电动机的起停次数较多。

降低风电场综合厂用电率可行性方法

1. 计量表计准确度检查

在年度预防性试验中,利用停电检修时间对相关表计互感器进行了绝缘电阻检测、工频耐压试验、绕组极性检测和误差测量等试验,同时相关表计送往电科院进行了校验,准确度、误差值等也符合相关要求。确保表计处于合理误差范围,避免因线路计量表计超差与误差导致损失风电场的电量。

2. 降低站用电

从风电场用电量数据来看,海宁尖山风电场夏季站用电量较大,主要由夏季大量使用空调器、风扇散热引起。在日常运行生产过程中,还应加强对生活用电的管理,诸如室内照明、计算机等设备用电,加强节约用电的管理规范和宣传力度。

3. 降低无功补偿设备用电量

风电场属于间断性发电,在发电过程中,有功功率较大,功率因数通常能达到考核标准;不发电时,风电场相当于用电用户,下网有功功率较小,需要SVG发出无功功率来平衡功率因数。根据海宁尖山风电场不同有功下吸收的电网无功对比可发现,当全场出力大于特定值时,不投入SVG也几乎不产生下网无功功率。根据风电场的实际运行情况,在不损坏设备的前提下,适当自动投切SVG,

节省了更多的下网电量。

4. 降低风电机组自用电

小风天气,下网电量增加的主要原因是风电机组自用电增加,风电机组用电的设备有变桨电动机、偏航电动机、散热风扇及齿轮箱油泵电动机等。夏季由于环境温度较高,风机散热风扇长时间运行,增加了夏季的用电量。

机组在达不到并网条件时,即使启动起来也不能并网,不但磨损设备,而且需要吸收电能。调整启动风速,就可以减少启动频率,降低风机自用电。

5. 降低风机日常维护损耗电量

要搞好机组的检修维护与日常消缺,提高检修、消缺质量,避免机组发生不必要的临停。

要加强对职工的教育与培训,以提高运维人员的节能意识与技术水准。在风机发生故障时,能够准确找到故障点,及时处理故障,减少非必要的故障停机。

此外,机组的计划检修也要尽量安排在小风天气乃至无风天气的期间实施。提早规划风机定期维护,以减少损失风机电量。**EA**

(收稿日期:2022-09-19)

参考文献

- [1] 王哲峰,王珊珊.降低风电场综合厂用电率的探讨[J].内蒙古经济与科技,2012(3).
- [2] 张卫东.风力发电场综合厂用电率分析[J].科技与展望,2016(15).
- [3] 赵宇峰.风电场综合场用电率的研究[J].勘测设计与电力,2016:77-80.

