基于风功率预测数据的风电场升压变电站运行方式优化技术的研究与应用

风电场升压变电站联结多个风资源丰富地区的风机群，一般安装两台及多台变压器，其运行方式存在着基于风机出力变化进行优化调整的可行性。本文依据风功率预测数据将变压器运行方式进行时间域度分类，研究不同时间域变压器降损、设备投切费用、操作次数等多因素的综合分析方法，并结合变压器的过载能力和弃风损失得出风电场升压变经济运行控制的可实施性原理，针对具体仿真算例，对所提出的理论进行了校验。

张忠林[1] 刚宏[1] 邱鹏[1] 王刚[2] 刘莉[2]/1. 国网辽宁省电力有限公司锦州供电公司
2. 沈阳工程学院

张忠林/高级工程师

关键词/Keywords
风电场升压变·
运行方式·
风功率预测数据·

0 引言

近年来，新兴能源（风能、太阳能）大规模接入电力系统比例逐年递增，可再生能源的波动性和间歇性给现有电力系统稳定和经济运行带来了新的问题，目前国内外研究的热点主要集中在采用备用容量或控制手段动态平衡可再生能源出力[1]，在新能源经济运行领域上研究较少，本文主要从风电场运行方出发，研究具备现场可实施性的基于风功率预测数据的变压器经济运行分析方法，在安全可靠供电的前提下，使变压器电能损耗为最小，全面提升变电站运行的经济性。

与传统配电网降压变压器经济运行不同的是，风机出力可依据风功率预测数据得到，以日前预测数据为例，全球范围内商业运行的风电预测软件的平均绝对误差（mean absolute percentage error,MAPE）约14%～20%[2]，风功率预测数据可信度较高[3]，在潮流计算、经济调度、出力组合及无功优化等问题中，经过数据处理和域度分析，风功率预测数据依然有广泛的应用空间[4-6]。

关于变压器经济运行问题的研究，国内外已有不少文献报道，主要集中在对单个变电站内多台变压器运行方式之间的选择上[7]，通过分析各种运行方式下的变压器经济运行曲线，确定在不同负载条件下的最佳运行方式，在变电站接线方式较为简单、变压器运行方式可以分为单台运行或多台并联运行以及分裂运行的情况下，需要选择最合理的变压器运行台数，对不同规格的变压器还需要选择是哪几台变压器运行，使变压器总损耗最小。文献[8]研究了考虑设备投切成本及设备开断寿命的变压器运行方式选择问题。在以往的研究中，对于变压器运行方式的选取通常都是根据变压器经济运行曲线来确定，其理论依据可以近似认为是精确模型，但该方法所依赖的原始负荷数据是通过台变负荷预测而来，而配电网馈线数据的缺乏和不精确导致该数据的准确度得不到保障，所确定的变压器运行方式是否最优值得商榷。

相对于配电降压变负荷预测数据，风功率预测数据精度更高，基于该数据开展风电场升压变经济运行方式调度具备现场应用的价值，目前有关这方面的研究在国内外文献中出现较少，本文提出的风电场升压变经济运行控制策略，是依托于风功率预测数据，考虑变压器容量限制、设备投切费用、变电所运行

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方式变化次数限制和运行方式最小持续运行时间限制等多种约束条件，以全时段内的有功功率损耗最小为目标的时段性优化模型。本文研究成果可以解决风电场升压变压器在平均负荷较轻时间段的设备容量闲置，损耗较大以及无检修和事故备用的问题。

1 变压器经济运行理论

1.1 变压器经济运行的计算原理及依据

根据《电力变压器经济运行导则》（GB/T 13462－2008）提供变压器经济运行方式临界功率的计算公式为

$$S_{LZ}=\sqrt{\frac{(P_{\sigma 0Z})_{\mathrm{II}}-(P_{\sigma 0Z})_{\mathrm{I}}}{K_T\left[\left(\frac{P_{\sigma kZ}}{S^2_{\sigma N}}\right)_{\mathrm{II}}-\left(\frac{P_{\sigma kZ}}{S^2_{\sigma N}}\right)_{\mathrm{I}}\right]}} \tag{1}$$

式中，S_{LZ}为并列运行的双绕组变压器经济运行方式的临界视在功率，kV·A；K_T为负载波动损耗系数（一定时间内，负载波动条件下的变压器负载损耗与平均负载条件下的负载损耗之比）；$P_{\sigma 0Z}$为综合功率空载损耗的组合参数，kW；$P_{\sigma kZ}$为综合功率额定负载损耗的组合参数，kW；$S_{\sigma N}$为组合变压器额定容量，kV·A；

Ⅰ、Ⅱ分别为变压器两种不同的运行方式。

1.2 变压器有功损耗特性分析

变压器在传输功率的过程中其空载损耗在电压稳定时基本不变，而有功损耗则随变压器负荷量的变化呈平方关系变化。两种运行方式的有功损耗特性曲线交点处的功率称为它们的临界功率，该点的两台变压器功率损耗相等。比较两种运行方式变压器的功率损耗，可以直观地区分不同运行方式有功损耗特性的优劣。 以辽宁锦州龙湾升压变电站参数为例，变压器型号为SZ11－50000/220，变压器台数为3台，变压器参数ΔP_0=34.55 kW，ΔP_S=180 kW，I_0%=0.65，U_S=12.5%。分析如下。

（1）单台变压器和两台变压器的临界功率及经济运行区间计算

$$S_{\mathrm{LZ}}=\sqrt{\frac{(P_{\sigma 0Z})_{\mathrm{I}}-(P_{\sigma 0Z})_{\mathrm{II}}}{K_T\left[\left(\frac{P_{\sigma kZ}}{S^2_{\sigma \mathrm{N}}}\right)_{\mathrm{II}}-\left(\frac{P_{\sigma kZ}}{S^2_{\sigma \mathrm{N}}}\right)_{\mathrm{I}}\right]}}$$

$$=\sqrt{\frac{34.55-69.1}{\frac{360}{100\ 000^2}-\frac{180}{50\ 000^2}}}=30.97\ \mathrm{MV\cdot A}$$

（2）两台变压器和三台变压器的临界功率及经济运行区间计算

$$S_{\mathrm{LZ}}=\sqrt{\frac{(P_{\sigma 0Z})_{\mathrm{I}}-(P_{\sigma 0Z})_{\mathrm{II}}}{K_T\left[\left(\frac{P_{\sigma kZ}}{S^2_{\sigma \mathrm{N}}}\right)_{\mathrm{II}}-\left(\frac{P_{\sigma kZ}}{S^2_{\sigma \mathrm{N}}}\right)_{\mathrm{I}}\right]}}$$

$$=\sqrt{\frac{69.1-103.65}{\frac{540}{(150\ 000)^2}-\frac{360}{(100\ 000)^2}}}=53.66\ \mathrm{MV\cdot A}$$

上述两式结论，确定了变压器不同运行方式下的临界功率。当功率小于30.97 MV·A时，单台变压器并列运行较为经济。当功率大于30.97 MV·A小于53.66 MV·A时，两台变压器并列运行较为经济。当功率大于53.66 MV·A时，三台变压器并列运行较为经济。

依据《国家电网公司风电场接入系统设计内容深度规定》，风电场在任何运行方式下，其额定运行时功率因数0.98（超前）～0.98（滞后）。由此可假定升压变高压侧功率因数为1，而升压变高压母线一般装设SVG或SVC补偿设备，其电压近似为额定电压，通过上述假定，可得三台变压器并列运行时，有功功率损耗方程为

$$\Delta P=\frac{1}{3}\frac{P^2+Q^2}{V^2}R_T+3\Delta P_0 \approx \frac{1}{3}\frac{P^2}{V^2}R_T+3\Delta P_0 \tag{2}$$

二台变压器并列运行时，有功损耗方程为

$$\Delta P=\frac{1}{2}\frac{P^2+Q^2}{V^2}R_T+2\Delta P_0 \approx \frac{1}{2}\frac{P^2}{V^2}R_T+2\Delta P_0 \tag{3}$$

一台变压器运行时，有功损耗方程为

$$\Delta P=\frac{P^2+Q^2}{V^2}R_T+\Delta P_0 \approx \frac{P^2}{V^2}R_T+\Delta P_0 \tag{4}$$

1.3 变压器经济运行区间曲线

根据变压器经济运行区间曲线，两条曲线交

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

点的横坐标即为两种运行方式的临界功率。如图1所示。单台变压器的有功损耗与两台变压器有功损耗的交点为30.97 MV·A；两台变压器的有功损耗与三台变压器有功损耗的交点为53.66 MV·A。

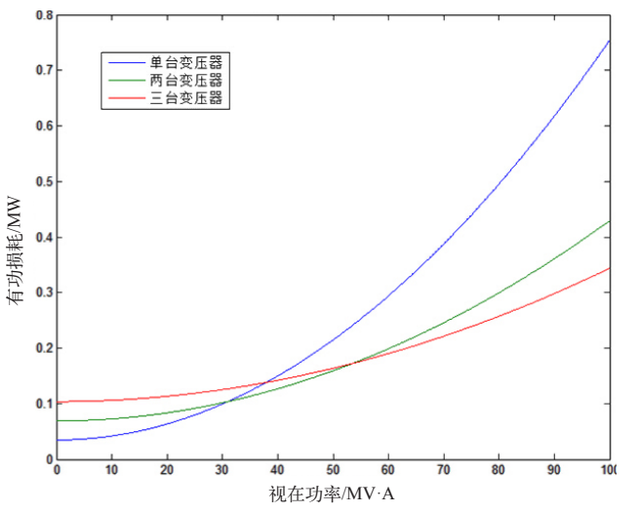

图1 龙湾升压变压器功率损耗特性曲线

2 风电场升压变经济运行控制策略

2.1 多时段控制策略及相关数据

研究变压器经济运行的主要目的是为了给调度决策提供科学的依据。调度人员做出运行方式决策的依据是某一段时间风电功率预测结果。在实际工作中，调度工作需要确定的是在一个时间段内（日、周、月及季度等）变压器运行方式的优化组合方案，使该时间段内，整个变电所的功率损耗最小。由于变电所的运行方式不能频繁变化，同时相邻两次运行方式的变化需要一定时间间隔。这就要求做决策的时候，不仅要在每一个阶段选择最优的运行方式，而且在整个的时间段内，要保证决策的最优。因此，各个阶段决策的选取不是任意确定的，不能简单的选取本阶段的最佳运行方式，它依赖于当前面临的状态的选择，又影响以后的状态选取。这就使得变压器经济运行方式的控制方案的确定变成了一个比较复杂的多阶段的决策问题。为此，兼顾技术、经济两个因素，可采用多时段控制策略。

在风电场升压变经济运行当中，从操作频次的约束中会出现变压器过载和弃风两种情况，需将设备操作折旧费用和弃风费用核算到成本支出中。

（1）变压器过载能力标准

根据《GB/T 1094.7—2008油浸式电力变压器负载导则》规定，变压器过载能力如下：

变压器过载10%可持续运行 180 min，变压器过载20%可持续运行 150 min，变压器过载30%可持续运行 120 min，变压器过载60%可持续运行 45 min，变压器过载60%以上后持续时间较短，已不适合风功率预测数据15 min时间单位的研究依据，该导则作为本文分析经济运行控制策略变压器过载的依据。

（2）弃风损失

根据《国家发展改革委关于适当调整陆上风电标杆上网电价的通知》得知，风电上网电价为0.61元/kW。因此基于风功率预测数据（每个预测点持续时间15 min，即0.25 h）计算的弃风损失费用计算

$$W=(P_f-P_{full})\times 0.25\times 0.61\ (\text{元}) \qquad (5)$$

式中，P_f为预测风值，单位kW；P_{full}为变压器满载或过载最大容量，单位kW。

（3）设备操作折旧费用

变压器的投切需要空载操作，倒闸操作的费用包含变压器折旧，断路器及隔离开关的投切费用，依据文献[8]所述内容，结合辽宁龙湾升压变设备数据，得出结论如下。

设在 98℃下，变压器的典型寿命为20年。一次切空变导致的绕组温升会损失其寿命中的 0.037 h。龙湾变压器价格为150 万，一次切空变损失价值

$$\Delta S_0=150\ 000[0.037/(20\times 8\ 760)]\approx 0.32\ \text{元}$$

高压侧断路器假设可以开断 130 次。已知开断一次这样的电流，断路器损失的价值

$$100\ 000/130=769.2\ \text{元}$$

低压侧断路器不存在电源侧断路器的负载情况，损失机械寿命，损失价值

$$\Delta S=100\ 000/10\ 000=10\text{元}$$

在切合变压器的倒闸操作中，同样涉及隔离开关的操作。由于隔离开关不开断电流，只损失机械寿命。在一次切空变（合空变）的操作中，先后要开断7个隔离开关，损失价值

$$\Delta S_6=7(50\ 000/10\ 000)\text{元}$$

总计 0.32+769.2+10+35=814.52元

2.2 风功率预测数据处理方案

本文所研究内容是基于风功率预测数据的多

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时段经济决策，因此第一步工作需将风功率预测数据进行多时间尺度的分类，分类的原则是将风功率预测曲线按照变压器经济运行临界功率点进行时间周期的聚类，同时分析变压器容量的限制（含过载情况）带来的周期时间点的变化。风功率预测数据处理方案如图2所示。

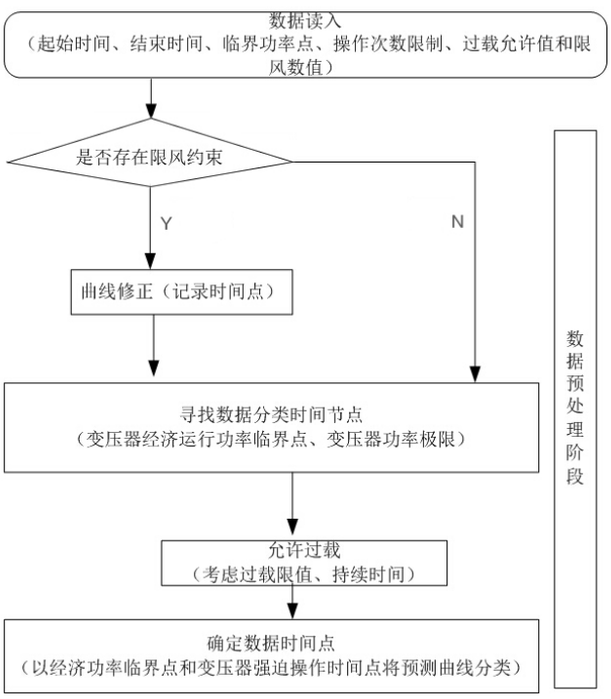

图2 风功率预测数据预处理方案

2.3 动态决策方案（理论最优方案）

动态实时决策方案主要是基于风功率预测曲线数据，从理论上分析最大可能的降损费用。该方案的特点是根据降损与投切费用比较进行“实时（周期短）”控制分析，可以在不计投切次数限制的基础上得到最大可能的降损目标，分析结果可供工作人员参考，仅在理论上具备应有价值。方案分析需要的数据包含：风功率预测数据，变压器临界经济功率点，变压器过载能力，投切次数限制。图3为方案技术路线。

动态决策方案依据风功率预测数据的分类结果分析不同时间区域各种运行方式的降损比较结果，在考虑设备操作费用和变压器过载能力后给出决策方案，该方案并未考虑设备操作频次的要求，采用该方案会对电网的稳定性和设备寿命带来一定影响，方案得出的是仅具备理论上最大可能的降损结论，但该分析方法是后续决策方案的数据基础。

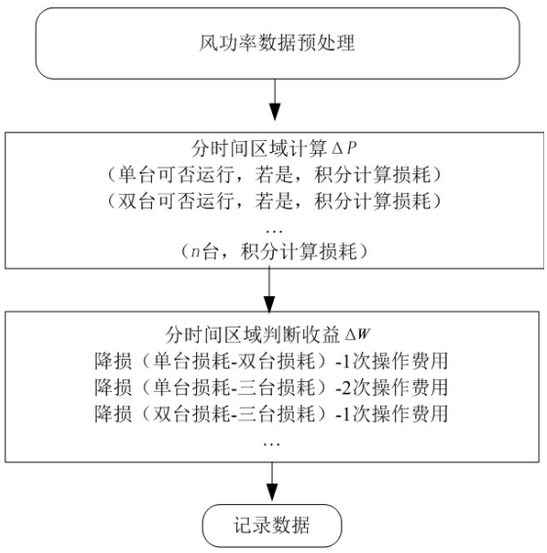

图3 基于风功率预测数据的变压器经济运行动态决策方案

2.4 周期决策方案（操作频次最少方案）

周期决策方案与动态决策方案截然相反，是研究如何确定未来长时间周期的运行方式，并计算风速过大时弃风损失与整体收益的技术方案 。周期决策主要基于历史数据分析未来长周期变电站可实现降损的最优运行方式，该方式为固定运行模式不变或以月（n周）频次改变，对于急行风和风功率预测超限情况，采用变压器过载或限风方式进行控制并分析方案的经济性。本方案的特点是长周期的切换变压器运行方式，具备现场的可应用性，但对于突发风况和预测超限风况，采用变压器过载或限风方式，会影响方案的经济效益，本方案重点研究收益与弃风损失的比较。方案分析需要的数据包含：风功率预测数据、历史运行数据、变压器临界功率点、变压器过载能力。图4为方案技术路线。

2.5 综合决策方案（建议方案）

综合协调模式总体原则综合上述两种方案的优缺点，基于历史风电场出力及测风数据，以长时间段（可选）为时间周期确定变电站的未来运行方式，解决基于风功率预测曲线功率越限和

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

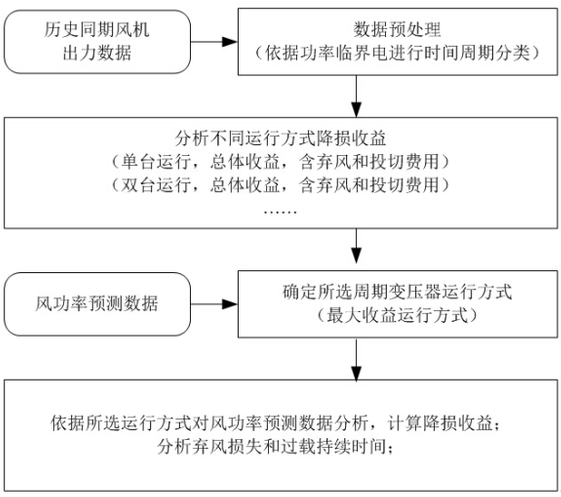

图4　基于风功率预测数据的变压器经济运行周期决策方案

短时急行风（测风数据）带来的运行方式投切问题。方案主要是根据历史出力或测风数据确定未来长周期运行方式，根据预测数据和测风数据对运行方式进行调整，本方案中设备的投切次数限制得到了保证，方案具备一定的可实施性。方案分析需要的数据包含：风功率预测数据、风电场历史出力数据、测风实时数据、变压器临界功率点、变压器过载能力、限风数值。图5为方案技术路线。

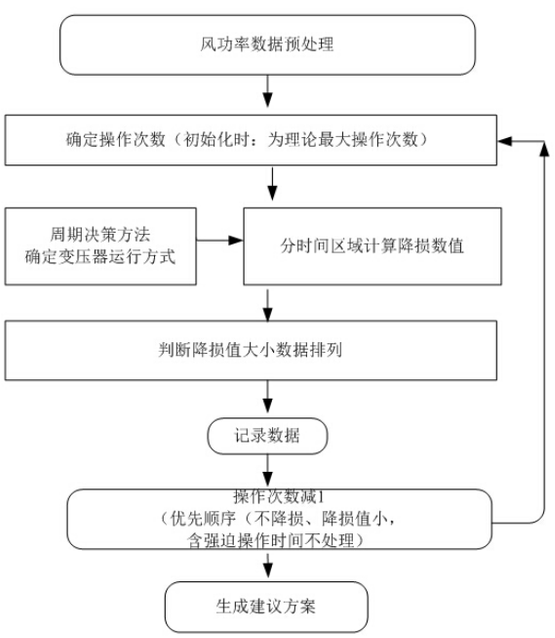

图5　基于风功率预测数据的变压器经济运行综合决策方案

综合决策方案的实现是对风功率预测数据处理后，在周期决策方案所制定的运行方式条件下，进行动态决策方案的多时段降损分析计算，并对计算结果进行降序排列选择，每次迭代去掉降损最小或含变压器容量限制的强迫操作时间区域，直到将倒闸操作全部去掉，分析每一步收益，得到操作次数1~n次的降损收益报告，并定义

$$\eta_i=\Delta W_i / n_i \qquad (6)$$

式中，η_i为降损收益率；ΔW_i为降损费用；n_i为操作次数。

通过比较1~n次操作的降损收益率，将$\eta_{i\text{-max}}$的操作次数、降损分析、操作时间点、弃风损失和过载持续时间等建议给用户进行选择。

3　仿真算例

3.1　算例分析采用的基础数据

本文采用辽宁锦州龙湾风电场升压变作为研究数据。龙湾风电场设计之初考虑项目法人单位分表计量和电费结算的实际需要共配置三台主变，而风电场一般折合满发2 000～2 200 h，平均负荷较轻，存在设备容量闲置，损耗较大问题。三台主变压器型号一致SZ11－50 000/220，主变数据为ΔP_0=34.55 kW，ΔP_S=180 kW，I_0%=0.65，U_S=12.5%。变电站主接线形式高低压侧均为单母三分段，每组变压器单元均有2组断路器和7组隔离开关开断，经计算风电场主变年均损耗电量为180万kW·h。

本文选取的采样区间为2014.7.30~9.26（58天）龙湾风电场第三季度的风功率预测数据，数据如图6所示。

3.2　数据分析及数据预处理

以15 min为单位取一次风功率（以下简称功率点，单位：个），将图6数据进行数据整理，并按照2.1预处理方案进行分析，统计风功率分布概况。得出结论如下。

表1　基于变压器功率限制的预测数据分布

额定功率区间/MV·A	<50	50～100	>100
功率点数	4 176	885	507

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

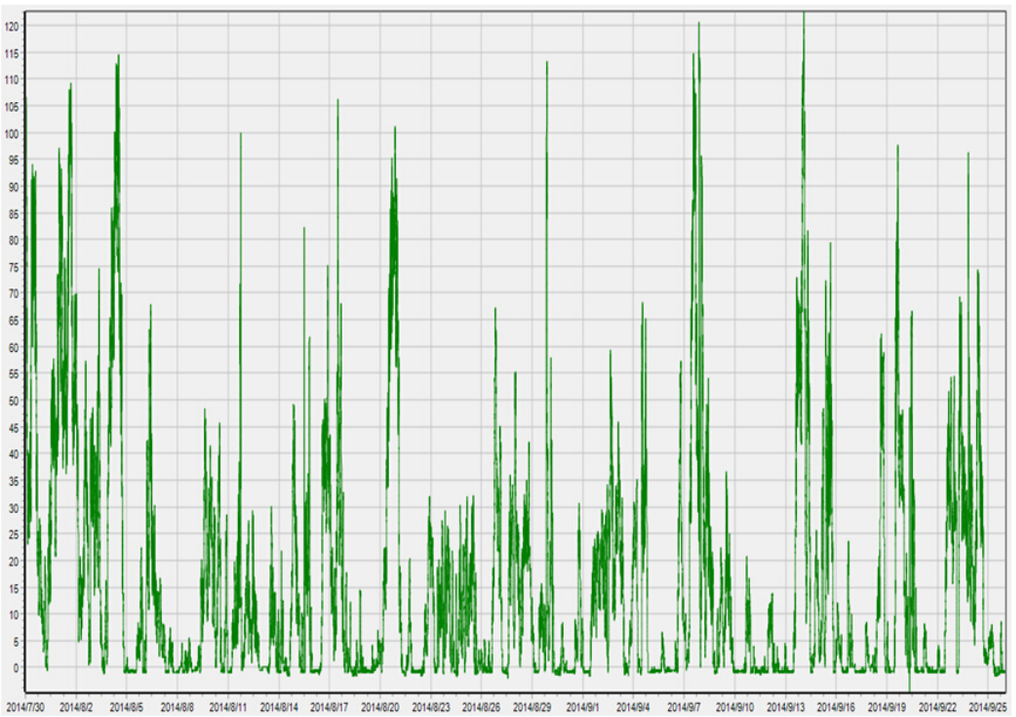

图6　2014.7.30～9.26龙湾升压变风功率预测值

表2　基于变压器经济临界功率的预测数据分布

临界功率区间/MV·A	（单变临界）<30.97	（双变临界）30.97～53.66	（三变临界）>53.66
功率点数	3 547	829	1 192

通过图6、表1和表2整理的数据可以看出，龙湾风电场升压变在2014年八九月份处于少风季节，其预测发电功率只有20%左右处理三台变压器并列运行经济的功率范围之内，因此具备改变变压器运行方式实现变压器经济运行的前提条件。

表3　数据预处理方案结果

时间区间总数/MV·A	<30.97	30.97～53.66	>53.66
63	25	17	21

3.3 决策方案结果

基于表3 数据预处理结论及详细时间区域点分布数据，根据图3动态决策方案的分析方法，得到动态决策方案如表4所示。

表4　动态决策方案

	时间区域	包含功率点	操作次数	降损数值/元（相对于三台并列运行）
单台	11	1 794	44	17 942.5
双台	5	2 525	10	9 860.8
三台	6	1 249	0	0
总计	22	5 568	54	27 802.5

根据表4周期决策方案的分析方法，得到周期决策方案如表5所示。

表5　周期决策方案

	两台主变并联运行
降损数值（相对于三台并列运行）	12 706.4元
变压器过载	120%累计172 h
时间累计	最大持续时间1.5 h
弃风费用	2 126元(超出变压器过载持续时间)
总体收益	10 508.4元

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6 综合决策方案

	两台主变并联运行
运行方式调整次数	3次为单台运行 1次为三台运行
调整时间区域包含功率点	1 342
变压器单元操作次数	8次
变压器过载时间累计	120%累计99 h 最大持续时间1.5 h
弃风费用	2126元(超出变压器过载持续时间)
总体收益 (相对于三台并列运行)	14 077.9元

4 结束语

本文主要研究具有现场应用价值的风电场升压变经济运行的控制策略，通过算例仿真可知，理论上存在的动态投切方案虽具备最大的降损效益，但由于其设备操作频次过多会导致安全稳定问题，因此不可能被现场采纳，在其基础上研究的长周期决策方案具备一定现场应用价值，根据算例给出的2014年八九月份数据，少风或多风季节采用该方案是可行的，但从全年数据来看，大多数预测功率变化范围处于40～120 MW之间，且风速波动经常处于两台运行和三台运行经济性最优间振荡，因此在其他月份很难找出能够持续三天以上的周期决策模式，总体来看，综合决策方案兼顾了动态决策和周期决策两种方案的优点，实现了在一定周期内以某种运行方式运行，当风功率出现较长时间变化时进行调整的方案设计，既实现了降损优化，又具备了现场可操作性。

本文的研究成果可以用于指导和实现各种容量的风电场升压变电站的经济运行方式。目前，各风电场变电站配置的变压器容量既要满足所有风机的额定功率，同时也要考虑未来的规划，但由于风电机组出力的不稳定性和受限于调度要求，变压器很难长时间工作在其经济运行功率点，同时考虑变电站安全稳定性、电气设备投切次数与其使用寿命的影响等因素，现场很难根据实际风机出力的变化改变变电站的运行方式，使得风电场变电站的经济性难以保证。本文的研究基于现有的电力系统分析技术，结合智能控制技术手段，使功率在多台变压器上合理分配，实现变电站的经济运行，在风电场升压变电站的运行中具有指导意义。

参考文献

[1] 孙国强，李逸驰，等. 计及风速时空相关性的含风电场电力系统动态随机最优潮流计算[J]，中国电机工程学报，2015,35(17):4308-4317.

[2] Bessa R, Monteiro C, Miranda V, et al. Wind power forecasting state-of-the-art 2009[R]. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 2009.

[3] 徐曼，乔颖，等. 短期风电功率预测误差综合评价方法[J]，电力系统自动化，2011,35(12):20-26.

[4] Ding Huajie, Hu Zechun, Song Yonghual. Stochastic optimization of the daily operation of wind farm and pumper-hydro-storage plant[J].Renwable Energy, 2012(48): 571-578.

[5] 李立成，叶林. 采用虚拟调节算法的风电场有功功率控制策略[J]，电力系统自动化，2013,37(10):41-47.

[6] 王成福，梁军，张利，等. 考虑风功率分布规律的风电场无功补偿容量优化[J]，电力系统自动化，2012，36(14):119-124.

[7] 黄向前，浅谈变电所内变压器的经济运行[J]，电网技术，2000，24(3):66-69.

[8] 佘楚云，王承民， 连鸿波. 计及设备寿命折损的配电变压器经济运行方式效用分析[J]，电力系统自动化，2009，33(15):47-50.

作者简介

张忠林（1964-），男，研究生，高级工程师，主要从事电力系统分析及仿真建模。

（收稿日期：2015-12-10）EA

（编辑：张万英）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net