

【变压器】

大工业企业节能潜力分析

文/江苏安科瑞电器制造有限公司 张 振 柳恺华
安科瑞电气股份有限公司 苏振宇

以某企业为例，实时监控了企业变配电设备的状况，通过对变压器的运行状态进行分析，对变压器是否经济运行进行了详细的论述，挖掘节能潜力，提出相应的节能技改建议，为企业节能降耗和提高设备运行效率及质量提供决策依据。

当前环境污染日益严重，能源日趋紧张，节能减排将成为大家关注的重点。与此同时，能源价格逐渐攀升，企业如何更好地降低能源消耗，无疑成为企业提升核心竞争力的关键点。

电能是工业企业进行生产的最主要能源，如何有效地减少企业的电能消耗，对于企业经济效益的提高及国家的能源战略都具有重要的现实意义。

变压器是重要的电气设备，通过提高变压器利用率，实现变压器经济运行，可稳定供电质量，有着较好的经济效益及安全意义。

本文以某企业为例，通过对变压器的运行状况进行实时监控和分析，为企业节能降耗、提高设备运行效率和质量提供决策依据。

企业变压器基本情况

某企业变电所内装有1台双绕组三相变压器，该变电所有10 kV电源进线和0.4 kV出线，具体的额定参数见表1。

表1 变压器额定参数

相数	三相
绕组数量	双绕组
额定容量 $S_N/\text{kV}\cdot\text{A}$	500
空载功率损耗 P_0/kW	1.16
额定负载功率损耗 P_k/kW	4.88
空载电流 I_0 (%)	0.9
阻抗电压 U_k (%)	4.0
接线组别	DYn0

在变压器的0.4 kV低压侧出线端安装多功能电力仪表，每5 min监测一次变压器的全电参量，1 h内主要电参量的采集值见表2。

表2 变压器主要电参量采集值

时间	P/kW	$\text{EPI}/\text{kW}\cdot\text{h}$	$\text{EQL}/\text{kW}\cdot\text{h}$
2021/1/8 0:00:00	148.85	3 374 644	641 926
2021/1/8 0:05:00	162.25	3 374 656	641 930
2021/1/8 0:10:00	155.56	3 374 670	641 932
2021/1/8 0:15:00	157.58	3 374 684	641 936
2021/1/8 0:20:00	254.75	3 374 702	641 942
2021/1/8 0:25:00	270.86	3 374 724	641 946
2021/1/8 0:30:00	276.81	3 374 746	641 952
2021/1/8 0:35:00	223.87	3 374 768	641 958
2021/1/8 0:40:00	224.55	3 374 786	641 964
2021/1/8 0:45:00	87.23	3 374 798	641 966
2021/1/8 0:50:00	84.15	3 374 806	641 966
2021/1/8 0:55:00	87.92	3 374 814	641 966

企业节能潜力分析与计算

为了寻找企业能源消耗问题节点和薄弱环节，进一步挖掘节能潜力，达到降低企业的电能损耗和线损、节省用能成本的目的，本文使用了一种节能潜力分析的方法。变压器经济运行是指在确保安全可靠运行及满足供电量需求的基础上，通过对变压器进行合理配置，对变压器运行方式进行优化选择，对变压器负载实施经济调整，从而最大限度地降低变压器的电能损耗。

本文通过计算变压器损耗和经济负载系数，划分经济运行区，从而判断变压器是否经济运行，并以此为依据及时采取调整变压器间负载、平衡变压器各相间负载、调整变压器负载率、进行削峰填谷及更新变压器等措施。

1. 变压器损耗

变压器耗损的计算值是判断变压器值是否经济运行的数据基础，使用户可以更加直观地掌握变压器的实时运行状况，同时对降低供电损耗具有重要的作用。计算得出变压器损耗之后即可估算变压器对应损耗的电能，从而让用户了解当前能源浪费的情况，对降低费用支出有极其重要的作用。

(1) 平均负载系数和负载波动损耗系数计算

计算变压器有功功率损耗、无功功率损耗和综合功率损耗时需要考虑负载波动损耗系数对于计算结果的影响，平均负载系数 β 和负载波动损耗系数 K_T 是计算变压器损耗的基础，因此，在计算变压器损耗之前要先计算平均负载系数 β 和负载波动损耗系数 K_T 。

平均负载系数计算公式为

$$\beta = S / S_N \quad (1)$$

式中， S 是一定时间内变压器平均输出的视在功率； S_N 是变压器额定容量，为变压器额定参数。

负载波动损耗系数计算公式为

$$K_T = K_f^2 \quad (2)$$
$$K_f = \sqrt{T} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^T A_i^2}}{\sum_{i=1}^T A_i}$$

式中， K_f 是形状系数，二次方取值之后即为负载波动损耗系数； T 是统计期时间，单位为h； A_i 是每小时电量。

以某企业为例，根据上文列出的变压器额定参数和1 h内主要电参量的采集值，计算平均负载系数和负载波动损耗系数，计算结果见表3。

表3 变压器平均负载系数和负载波动损耗系数

1 h有功电能/kW·h	176
1 h无功电能/kW·h	40
额定容量 S_N	500
平均负载系数 β	0.36
形状系数 K_f	1.068
负载波动损耗系数 K_T	1.141

(2) 有功功率损耗计算

有功功率损耗计算公式为

$$\Delta P = P_0 + K_T \beta^2 P_k \quad (3)$$

式中， P_0 是变压器空载功率损耗； P_k 是变压器额定负载功率损耗； K_T 是负载波动损耗系数； β 是平均负载系数。

根据上文列出的变压器额定参数和计算结果，计算变压器有功功率损耗，计算结果见表4。

表4 变压器有功功率损耗

空载功率损耗 P_0 /kW	1.16
额定负载功率损耗 P_k /kW	4.88
负载波动损耗系数 K_T	1.141
平均负载系数 β	0.36
有功功率损耗 ΔP /kW	1.882

计算得到变压器有功功率损耗之后，就能得到损耗的电能，因此，该企业每小时损耗电能1.882 kW·h。

(3) 无功功率损耗计算

无功功率损耗计算公式为

$$\Delta Q = Q_0 + K_T \beta^2 Q_k \quad (4)$$

式中， Q_0 是变压器空载励磁功率，根据空载电流 I_0 和额定容量 S_N 计算得出； Q_k 是额定负载漏磁功率，根据阻抗电压 U_k 和额定容量 S_N 计算得出； K_T 是负载波动损耗系数； β 是平均负载系数。

根据上文列出的变压器额定参数和计算结果，计算变压器无功功率损耗，计算结果见表5。

表5 变压器无功功率损耗

空载电流 I_0 (%)	0.9
阻抗电压 U_k (%)	4.0
额定容量 S_N /kV·A	500
空载励磁功率 Q_0 / (kW·h/kvar)	4.5
额定负载漏磁功率 Q_k /kvar	20
负载波动损耗系数 K_T	1.141
平均负载系数 β	0.36
无功功率损耗 ΔQ /kW	7.457

(4) 综合功率损耗计算

综合功率损耗计算公式为

$$\Delta P_z = \Delta P + K_Q \Delta Q \quad (5)$$

式中， ΔP 是有功功率损耗； ΔQ 是无功功率损耗； K_Q 是无功经济当量。

无功经济当量 K_Q 按变压器在电网中的受电位置（变压次数）及功率因数取值。发电厂母线直配的

K_Q 值为0.04；二次变压的 K_Q 值为0.07；三次变压的 K_Q 值为0.10。当功率因数已补偿到0.9及以上时， K_Q 值为0.04。

根据上文计算得出的变压器损耗计算结果来计算变压器综合功率损耗，计算结果见表6。

表6 变压器综合功率损耗

有功功率损耗 $\Delta P/kW$	1.882
无功功率损耗 $\Delta Q/kW$	7.457
无功经济当量 K_Q	0.04
综合功率损耗 $\Delta P_z/kW$	2.18

注：由于本文企业的功率因数一直保持在0.9以上，所以无功经济当量 K_Q 取值0.04。

(5) 损耗率计算

变压器损耗率包括有功功率损耗率、无功功率损耗率及综合功率损耗率，计算公式为

$$\begin{aligned}\Delta P\% &= (\Delta P/P_1) \times 100\% \\ \Delta Q\% &= (\Delta Q/P_1) \times 100\% \\ \Delta P_z\% &= (\Delta P_z/P_1) \times 100\%\end{aligned}\quad (6)$$

式中， ΔP 是有功功率损耗； ΔQ 是无功功率损耗； ΔP_z 是有功功率损耗； P_1 是变压器电源侧有功功率。

根据上文计算得出的变压器损耗计算结果来计算变压器损耗率，计算结果见表7。

表7 变压器损耗率

有功功率损耗 $\Delta P/kW$	1.882
无功功率损耗 $\Delta Q/kW$	7.457
综合功率损耗 $\Delta P_z/kW$	2.18
1 h平均功率 P_1/kW	176
有功功率损耗率 $\Delta P\%$	1.07
无功功率损耗率 $\Delta Q\%$	4.24
有功功率损耗率 $\Delta P_z\%$	1.24

注：本文为了避免根据实时功率计算产生误差，保证计算的准确率，使用1 h内的平均功率代入公式进行计算。

2. 变压器经济运行

经济运行的变压器能使整个电力系统的有功损耗最小，从而降低电能损耗和线损，是获得经济效益的设备运行方式。因此，变压器的经济运行对降低能源浪费有极其重要的作用。

要判断变压器是否经济运行，首先要计算变压器经济负载系数，然后对经济运行区进行划分，判断变压器是否在经济运行区间负载运行。

(1) 经济负载系数计算

经济负载系数计算公式为

$$\beta_j = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \quad (7)$$

式中， P_0 是变压器额定空载功率损耗； P_k 是变压器额定负载功率损耗； K 是负载波动损耗系数。

根据上文列出的变压器额定参数和计算结果来计算经济负载系数，计算结果见表8。

表8 经济负载系数

空载功率损耗 P_0/kW	1.16
额定负载功率损耗 P_k/kW	4.88
负载波动损耗系数 K_T	1.141
经济负载系数 β_j	0.427

(2) 经济运行区划分

计算得到经济负载系数之后即可对经济运行区进行划分，分为高效运行区、经济运行区、合理运行区和不合理运行区。

1) 高效运行区。平均负载系数在 $2.0\beta_j^2 \sim 0.5$ 区间运行，即0.5为高效运行区上限，与上限损耗率相等的另一点 $2.0\beta_j^2$ 为高效运行区下限。在高效运行区运行的配电变压器节能效果最好。

2) 经济运行区。平均负载系数在 $0.5 \sim 0.75$ 区间运行，或在与负载系数0.5对应损耗率相等的另一点负载系数 $2.0\beta_j^2$ 到与负载系数0.75对应损耗率相等的另一点负载系数 $1.33\beta_j^2$ 区间。在经济运行区运行的配电变压器容量利用效果好。

3) 合理运行区。变压器在额定负载运行行为合理运行区上限，与上限损耗率相等的另一点为合理运行区下限。合理运行区上限负载系数为 $\beta=1.0$ ，合理运行区下限负载系数为 β_j^2 。

配电变压器负载系数在 $0.75 \sim 1.0$ 区间运行，或在与负载系数0.75对应损耗率相等的另一点负载系数 $1.33\beta_j^2$ 到在与负载系数1.0对应损耗率相等的另一点负载系数 β_j^2 区间运行。在合理运行区运行的配电变压器处于重载高损耗状态，或趋于轻载高损耗率状态。

4) 不合理运行区。配变在负载系数大于1.0（过载）区间运行，或在小于负载系数1.0对应损耗率相等的另一点负载系数 β_j^2 （轻载）区间。在不合理运行区运行的配电变压器处于过载高损耗状态，或处于轻载的极度高损耗率状态。

根据上文列出的计算结果，判断变压器运行在哪个区间，是否经济运行，判断结果见表9。

(下转第84页)

Modbus通信地址为40243~40252；峰谷平电能等参数地址为332~347，共16个字，对应通信地址为40333~40348。

采用Modbus通信访问多从站时，一般采用轮询的通信方式，即主站与第一个从站通信完成位激活与第二个从站的触发位，依次触发完成轮询。如图3所示，为实时采集数据的部分程序，可以看出指令库中的Done端口对应的M31.1就是1#仪表的通

信完成位。电能参数则利用触摸屏控制S7-300PLC的输出点Q39.7，再通过Smart 200的上升沿中断程序来完成通信开始指令。使用ATCH指令启动中断，中断事件号为0，在中断程序中依然采用轮询的通信方式，但最后一个从站通信完成后，无须再触发第一个从站，直接跳出中断程序即可。以上所有仪表参数存放在Smart 200的V存储区内，地址为VW0~VW155。

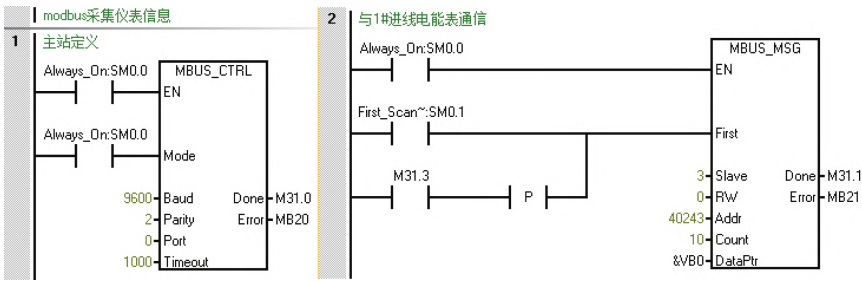


图3 程序组态图

电能的数据采集完成后，最重要的就是对数据的呈现与分析，形成最后的电能质量评估和管理。S7-300通过现场总线将Smart 200的V存储区数据存储在到本身的DB1数据块内，依然采用复杂数据类型UDT来存放，触摸屏访问数据块的各个参数，通过组态画面将整个用电系统使用情况呈现出来。在画面组态中，可显示各仪表的电压、电流和功率等实时参数，还可通过组态趋势视图更加直观地显示各参数的变化情况，现场操作人员可以利用视图分析历史用电情况，为日后优化废水处理站的工作提供了方便。

结束语

综上所述，废水处理站的自动化控制应用，提升了废水处理的效率、质量和安全性，而且对风机和水泵采用的变频控制，大大减小了经济成本和时间成本。中控室通过访问PLC子站的各项设备参数和用电数据，可以方便地了解现场运行情况以及对用电质量进行综合管理，使整个企业实现了效益最大化及成本最小化。EA

(收稿日期：2021-07-16)

(上接第57页)

表9 变压器运行状态

平均负载系数	0.36
经济负载系数 β_1	0.427
配变运行区	经济运行区
是否经济运行	是

如果变压器负载运行在非经济运行区内，则企业可以采取相关节能技改措施，以达到节能降耗和提高设备运行效率及质量的目的。常见的措施主要包括：调整变压器间负载，使变压器总综合功率损耗最小；平衡变压器各相间负载，降低变压器总综合功率损耗；调整变压器负载率或者采用削峰填谷，降低综合功率损耗率。对于判定为非经济运行且综合功率损耗大的变压器，企业应当及时更新。

分析的意义及收益

通过对变压器的运行状况进行监控和分析，对企业节能潜力，特别是节电进行深度挖掘。

使用本文的分析方法得到分析结果之后，采取调整负载、调整负载率、削峰填谷、无功补偿及更新设备等措施，提高设备运行效率及质量，保证设备经济运行，成本低，回收期短，经济效益明显。降低电能损耗和线损，避免能源浪费，不仅可以提高企业的核心竞争力，同时是保护环境和社会可持续发展的基础和源泉。EA

(收稿日期：2021-09-03)