

# 初探电网规划部分基础数据的节能意义

胡海安

(苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

**摘 要:** 分析了电网规划中变压器的负载率、容载比数据和变压器节能的初步关系, 计算了变压器经济运行时的容载比指标。明晰了电网线路负荷特性和线路能耗的关系, 得出在定时定量的电能输送模型及其实际应用中降耗的措施。深入分析大用户负荷特性数据和用电功率因数, 阐明了供需双赢的节能措施要点。最后分析了在当前经济发展背景下, 负荷特性数据隐含的节能意义, 为进一步深入的电网规划提供参考。

**关键词:** 电网节能; 电网规划; 电网损耗

## 0 引言

近年来, 随着我国经济的不断高速发展, 对电力等能源的需求量不断提高, 部分区域电力负荷屡创新高, 同时部分区域的电力负荷缺口也频频出现。在全球及国家层面, 提高能效、倡导节能减排, 力促经济可持续发展逐步成为一项能源战略。国家电网公司适时的提出了发展方式“两个转变”的战略部署, 电网节能越来越受到电网公司的重视。电网节能应分析电网的主要运行数据, 如负荷的大小及分布、主要变压器及线路的负载率、容载比、区域的负荷特性等, 在收集这些数据的基础上对电网运行进行分析, 可以为电网的滚动规划提供重要参考。同时部分电网规划的重要基础数据除了从宏观上反映出电能供需双方的情况以外, 其实还蕴含了重要的节能环保意义。深入分析一些数据的节能意义, 结合电网的规划, 进一步增加电网节能方面的思考, 将为当前背景下的电网规划注入新意。

## 1 变压器的负载率与节能

在年度的电网裕度分析中, 主要变压器的运行情况都是一项重要的数据, 变压器作为主要的供电设备, 通过计算变压器的负载率  $f$  和容载比  $r$  来大致判断供电能力和电力需求之间的关系。

单台变压器的负载率计算公式如下:

$$f = \frac{P}{\cos \varphi \cdot S_N} \quad (1)$$

其中:  $P$  为变压器有功负荷, 取平均有功负荷

更有实际意义;  $\cos \varphi$  为变压器的功率因数;  $S_N$  为

变压器的额定容量。但在某些统计中, 运用式(1)计算负载率的时候,  $P$  一般选择变压器某段时间内出现的最大有功负荷, 因此计算出的负载率也是一个最大负载率的概念。另外负载率的概念多偏向来说明单台变压器的运行情况。如果要分析某一特定区域变压器供电整体情况, 计算运用容载比数据更多。某一区域内变压器的容载比的计算公式如下:

$$r = \frac{\sum S_N}{P_{\max}} \quad (2)$$

其中:  $\sum S_N$  为该区域变压器容量的总和;

$P_{\max}$  为该区域出现的最大负荷。在一些电网规划导则中, 容载比是一个较为约束性的指标, 有些导则提出了原则上控制容载比 1.8~2.1 的规划约束目标, 由此来估计区域内供需的大体平衡并引导部分工程投资项目。

例如苏州某一区域 2011 年共有 110kV 变电站 13 座, 变压器总容量 130.9 万 kVA, 夏季最高负荷约为 65.4 万 kW, 区域整体容载比达到 2.0, 整体负载率为 55%。从宏观指标数据上看, 该区域的变压器配置较为正常。但是我们也注意到, 该区域变压器共有 29 台, 最大负载率在 50% 以下的有 11 台, 设备使用的经济性略显不足, 在变压器的使用效率和节能方面还可以作进一步的分析。

变压器的使用效率和它的负载率有着密切的关系, 变压器的有功损耗, 一般用下面的公式<sup>[1]</sup>来表示:

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_k \left( \frac{S_c}{S_N} \right)^2 \quad (3)$$

式中:  $\Delta p$  为变压器的有功损耗,  $\Delta p_0$  为变压

器的空载有功损耗,  $\Delta p_k$  为变压器短路有功损耗,

$S_c$  为变压器实际负载容量,  $S_N$  为变压器额定容量。

根据式(1)的概念,  $S_c$  与  $S_N$  的比值即为负载率  $f$ 。

根据式(3), 可以看出如果负载率高, 则变压器的有功损耗也就越高。但是在满足变压器一定供电能力的前提下, 分析能量损失率的大小才有实际意义。

因此应进一步分析损耗率  $\Delta p\%$  与变压器负载率  $f$

的关系<sup>[2]</sup>, 即:

$$\Delta p\% = \frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta p}{f S_N \cos \phi + \Delta p} \quad (4)$$

结合式(3)(4)可得出, 当  $p_0 = f^2 p_k$  时, 变压器有最小的损耗率。一般变压器  $p_0 = (1/4 - 1/3) p_k$ , 因此最低损耗率发生在负载率为 0.5~0.6 左右。由此可以再反过来估算区域的经济容载比。由式(1)和(2)可得:

$$r = \frac{k}{\cos \phi} \cdot \frac{1}{f} \quad (5)$$

$k$  为平均负荷与最大负荷的比值, 较为理想时可以取 0.8, 功率因数取 0.9 来初略处理, 计算出的经济容载比为 1.49~1.78。

经过以上分析可知, 变压器的负载率是一个与变压器损耗率密切相关的数据, 从理论上讲, 能够找到每一台变压器损耗率最小的最优负载率。因此在满足了电力供需平衡和供电可靠性的前提下, 对于负荷相对稳定的区域, 在电网规划中进一步考虑优化变压器的负载率, 对于运行中的变压器节能具有重要的意义。

## 2 电网线路的损耗与节能

电网规划中除了分析变压器的一些运行数据外, 还需要收集分析电网线路的运行数据。同样, 线路输送负荷数据中, 也包含了一些电能损耗方面的信息, 线路的电能损耗<sup>[3]</sup>用公式表示为:

$$\Delta E = 3I^2 RT \times 10^{-3} (kWh) \quad (6)$$

式中  $I$  为线路输送的电流有效值,  $R$  为线路的等效电阻。由于线路输送电流的瞬时变动性, 因此上式不具有具体的应用性。瞬时电流  $i$  在当前的监控系统中是一条随时间变化的曲线, 即电流  $i$  是时间的函数。以一天作为时间段来计量某条线路全天的电能损耗时, 式(6)可以变形如下:

$$\Delta E = 3 \int_0^{24} i^2 R dt = 3 \int_0^{24} \left( \frac{P}{\sqrt{3}u \cos \phi} \right)^2 R dt \quad (7)$$

根据积分的定义, 式(7)可以表示为:

$$\Delta E = 3 \sum \left( \frac{P_k}{\sqrt{3}u \cos \phi} \right)^2 R \cdot \Delta t \quad (8)$$

$p_k$  为每一个  $\Delta t$  时间内, 系统采集到的线路输

送功率数值。在式(8)中,  $u$  和  $\cos \phi$  可以通过技术调节可控制在较小的波动范围内, 用  $M$  来表示  $3(\sqrt{3}u \cos \phi)^{-2} \cdot R$ ; 则式(8)可表达为:

$$\Delta E = M \cdot \Delta t \cdot \sum_{k=1}^n p_k^2 \quad (9)$$

$$\text{即: } \Delta E = M \cdot \Delta t \cdot (p_1^2 + p_2^2 + \Lambda + p_n^2) \quad (10)$$

若用  $p_j$  来表示线路输送负荷曲线中一天  $n$  个  $\Delta t$  时间的功率均值, 则有

$$p_j = \frac{1}{n} (p_1 + p_2 + \Lambda + p_n) \quad (11)$$

由式(9)、(10)和推导出, 在满足式(11)的条件下,  $\Delta E$  有最小值:

$$\Delta E_{\min} = M \cdot \Delta t \cdot n \cdot p_j^2 \quad (12)$$

式(12)只在  $p_1 = p_2 = \Lambda p_n = p_j$  时成立; 即在相同时间内, 线路输送相同的有功时, 只有当符

合曲线为平行时间轴的直线时，线路的有功损耗最小。有了式（12）的结论，为规划和运行调控找到了一条减小线路损耗的办法。但是控制负荷曲线完全为水平直线难度较大，负荷特性曲线都是围绕均值上下波动。直观上，可以看出负荷高峰与低谷之间的离散性即峰谷差。实际上，实时负荷与均值见的离散性即线路的损耗是有直接关联的。

表征负荷离散性的统计学参数为方差  $\sigma^2$ ，输

送功率的方差为： $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (p_k - p_j)$ ，均值  $p_j$  相

等的条件下，假设一条负荷曲线 1 的方差大于另一条负荷曲线 2 的方差，即  $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ ，也即下式：

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (p_{k1} - p_j)^2 > \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (p_{k2} - p_j)^2 \quad (13)$$

$$\text{可进一步得出：} \sum_{k=1}^n p_{k1}^2 > \sum_{k=1}^n p_{k2}^2 \quad (14)$$

根据式（9）和式（14）可得出，曲线 1 的线路损耗大于线路 2 的线路损耗。于是就有了在相同时间内，线路输送相同有功电量的情况下，负荷曲线的离散性越小，其线路损耗就越小。这条结论是较有实用性的一个结果。特别对于用户用电相对固定的区域，可以理解为在一定时期内输送的平均电量大致相同，通过分析负荷的均值变化水平和离散性，就能为电网线路降低损耗提供规划思路。

### 3 大用户的负荷数据及节能

对于一些用专线接入的大用户负荷，通过负荷控制系统可以采集到用户的实时有功功率情况。一些典型用户的负荷情况，既可以作为一个侧面来反映当地的经济的运行情况，为负荷的预测提供一些参考，也能分析用户电能使用的效率。提高能效、降低损耗的结果是用户乐于见到的，只是用户有时对到达这个结果的措施还比较难以把握。因为在措施的执行过程中要考虑供电部分的规定要求，设计单位提供的接入系统方案、还有用户特定设备的用电实际和运行管理。相关的三方，其实是可以找到一个优化的方案，通过节能的最终目的达成供需双方的共赢，其中一个核心的问题是要利用大用户的

负荷等数据分析用户的用电功率因数。供电部门现在越来越重视对用户的服务，这其中就包括了对用户电压合格率的服务承诺，也就是在多大程度上保证用户的电压处在合格的范围内。对用户而言电压偏差的合格率直接关系到部分用电设备的效率甚至产品的合格率。有关国家标准<sup>[4]</sup>对此也进行了规定。但是一个实际情况是，电压偏差的合格与否和用户的功率因数有着密切的关系。例如钢铁企业电力设计手册上有过定量分析，以线路为例：

$$\Delta u = \Delta Q_c \frac{x_l}{1000 u_n^2} \times 100\% \quad (15)$$

式（3-1）中， $\Delta u$  为线路末端电压提高的百分比， $x_l$  为线路的感抗， $u_n$  为以千伏作单位的线路标称电压。

通过无功补偿的方式，提高了用户的电能质量，减少了供电部门和用户自身的电能损耗，是一个双赢的结果。根据上面的分析，应该注意的是，是否需要无功补偿，要根据用户自身的用电功率因数数值来决定。对于补偿容量的大小，除了一些经验值意外，有的用户甚至会进行投入产出分析。但前提是，用户能比较清楚自己的用电功率因数。从一些大用户的接入系统设计中可以看出，这部分的分析计算显得重视不够。

对于用户扩建工程的系统接入中，生产设备的负荷特性与前期应该比较相似，收集前期典型工作时间的负荷及电量情况，就能得出平均功率因数的数据：

$$\cos \phi = \frac{W_m}{\sqrt{W_m^2 + W_{rm}^2}} \quad (16)$$

式（16）中  $W_m$  为一段时间（例如一个月）的有功电量； $W_{rm}$  为该时间段的无功电量。

对于新建初投运的用户，估算用户的自然功率因数是很重要的一个工作，估算公式如下：

$$\cos \phi = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}} \quad (17)$$

式（17）中  $P_c$  为用户的计算有功功率； $Q_c$  为

计算无功功率。计算功率的计算有时较为繁琐，却是一个需要尽量准确估算的重要数据，除了对无功补偿容量的大小有直接的影响，同时对合理配置配电变压器的容量以及安排其运行方式最终达到节能目的都起到关键作用。

另外对用户无功负荷的特性曲线的分析，还能帮助制定电容器投入及退出的策略。即无功功率曲线波动较大时，需要进行有计划的自动跟踪补偿，无功功率曲线波动不大时，则可进行手动补偿。

当前，倡导以节能减排的供电服务越来越受到重视，有些供电企业开始成立能源服务公司，设计相关的增值服务，将进一步促进供用电关系的和谐共赢。

#### 4 负荷特性分析与节能

随着国家宏观调控及经济发展转型升级，进一步注重经济发展的平衡，经济结构的合理和经济可持续发展，因此经济增长的预期有所下降。这个趋势在电力负荷特性上可以得到部分的反映。下面就苏州某两个区域的负荷特性情况进行简单的分析。

区域甲是一个发展较为成熟的区域，比较近两年的负荷特性见表 1。

表 1 区域甲 2010、2011 年主要负荷特性表 MW

年份	最大负荷	最小负荷	平均负荷	负荷率/%
2010	720.68	109.18	281.99	0.39
2011	656.86	142.34	287.95	0.43

表 1 中反映的情况是，2011 年该区域最大用电负荷下降了 63.82MW，最小负荷上升了 33.16MW，峰谷差缩小了 96.9MW，平均负荷基本持平，平均负荷与最高负荷的比率明显上升 4%。说明在最高负荷下降的同时，通过规划和调整，电网结构进一步合理，设备利用率提高。年度平均负荷的基本持平及略有升高还体现了一定的经济性和用电质量的提高。特别的，根据本文式（13）、（14）的结论，该区域在电能输送过程中，电能的损耗也进一步下降，体现了工作的合理有效性。

区域乙是负荷还在增长的发展区域，比较近两年的负荷特性见表 2。

表 2 区域乙 2010、2011 年主要负荷特性表 MW

年份	最大负荷	最小负荷	平均负荷	负荷率/%
2010	1515.81	454.38	949.45	0.626
2011	1584.78	820.34	1018.55	0.643

从表2中可以看出，随着经济的增长，负荷需求的增量是明显的，最大负荷的增长达到4.55%；同时存量设备的利用率更是有了大幅度提高，最小负荷同比增长了80.5%；平均负荷的增长为7.28%，超过了最大负荷的增长率；这些数据说明在负荷增长的同时，兼顾了电网结构，使之进一步趋向合理。能耗比率稳步下降。

#### 5 结论

电网规划工作对满足电力供需的平衡，调节电网的结构起着重要的作用，在满足运行、安全、经济等约束条件的同时，促进电网节能，电网规划工作同样可以有所作为。本文通过对规划利用的基础数据和负荷特性进行了初步的分析：得出在变压器的负载率、容载比和变压器节能的初步关系；明晰了线路负荷输送特性和能耗的关系；大用户负荷数据与节能的一些要点；以及在当前经济发展背景下，负荷特性数据揭示的隐含节能意义，为进一步深入的电网规划提供参考。

#### 参考文献：

- [1] 任惠元. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 陈延鏢. 钢铁企业电力设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [3] 虞忠年, 陈星莺, 刘昊. 电力网电能损耗[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [4] GB12325-2008, 电能质量-供电电压允许偏差[S].

#### 作者简介：

胡海安（1975-），男，硕士研究生，高级工程师，高级技师，从事电网运行、规划工作，E-mail: huhai'an@163.com。