

基于层次分析法的能源互联网 综合能效评估方法

分析了面向能源互联网的综合能效评估边界,在现行有关规范和技术手册的基础上,构建了包括配电网以及热力网、负荷设备等元素的综合能效评估指标体系,对体系中各指标的计算方法进行了详细说明,并给出评价基准,应用层次分析法对各层指标进行权重分配,建立了以热力学第一定律能量分析为核心的综合能效评估方法。在此基础上,结合实际案例数据对指标体系和评估方法进行了算例分析,实现综合能效的量化评估。

吴 强¹ 程 林² 黄 河¹ 高 松¹ 郭艳飞² / 1.国网江苏省电力公司
2.清华大学电机系

0 引言

目前,我国正处在能源行业的关键转型阶段^[1],能源为人类生活与生产提供能量来源,每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新,在能源革命、“互联网+”和创新驱动等国家战略的背景下,产业界已经掀起能源互联网发展的浪潮^[2]。

能源互联网系统综合了能源生产、传输和消费等环节,满足系统内的电、冷、热和气等各种能量需求,实现了能源的高效利用和可再生能源的兼容^[3],低碳高效是能源互联网的基本特征之一^[4]。然而,能源互联网涉及要素众多,在缺乏有关能效指标体系及评价模型的基础上,对能源互联网的能效水平只能作定性评估,这显然无法满足未来能源互联网能效评估需求。而且,一个系统的能效水平也会反映系统对环境的影响程度^[5]。

因此,有必要开展能源互联网能效评估相关理论研究。

能效评估的理论基础主要有热力学第一定律和热力学第二定律两类:基于热力学第一定律的能效评估主要是能量评估法;基于热力学第二定律的能效评估主要是焓分析法。文献[6]应用焓分析法对区域热电联产系统能效进行了评价。文献[7]将焓分析法应用于英国的能源利用效率评价当中。文献[5]基于热力学第一定律,提出用“建筑一次能源能利用效率”指标来评价CHP系统的能效。文献[8]基于热力学第一定律总结了冷热电综合能源系统主要能效指标,构建评价指标体系对系统能效进行了评价。文献[9]分别用能量分析法和焓分析法比较了英国两类低碳能源系统(空气源热泵和热电联产机组)的能效,二者比较结果相同。基于热力学第二定律的焓分析法只能解决能源利用分析结论的准确性和可靠性问题,并未解决也不可能解决供能与用能的合理匹配问题;基于热力学第一定律的能量分析法只需要确定某些具体的参数,如流量、电量等对系统的能量利用情况进行分析,方法简便。

目前有关电网能效评估的研究较为成熟,但是在能源互联网环境下,要评价能源系统的能效,热力网以及各类能源生产、转换和存储等设备也必须综合考虑。本文在已有研究成果的基础上,开展面向能源互联网的综合能效评估方法研究,建立了适用于能源互联网的综



吴 强/高级工程师

关键词/Keywords

综合能效·
层次分析法·
评估体系·
能源互联网·

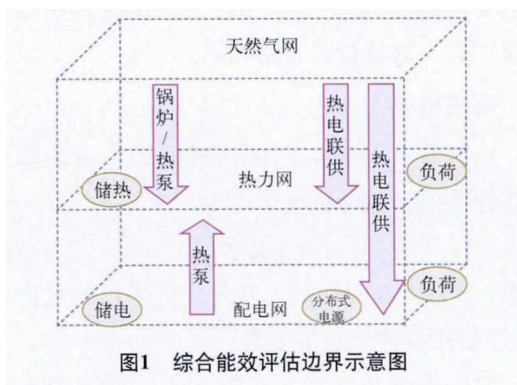
863计划:主动配电网关键技术研究及示范
(2014AA051901),能源互联网下智能配电网规划关键技术
技术研究及应用(J2016005)。

合能效指标体系, 基于层次分析法构建了综合能效评估模型, 设计了以热力学第一定律能量分析为核心的综合能效评估方法, 并对综合能效评估方法的应用进行了算例分析。

1 综合能效评估指标体系

1.1 评估边界

综合能源系统是能源互联网的物理载体^[10]。文献[11]提出综合能源系统应考虑所有相关的能源载体（电、热和燃料等）和服务（照明、交通和烹饪等）。文献[12]提出综合能源系统包括电力、热力等各类能源，涵盖区域、社区和家庭各层次的能源系统。文献[13]指出综合能源系统研究边界是中压电网、中压天然气网络和热力分配网络，而且作为能源转换技术的重要载体，热电联产机组和热泵必不可少。面向能源互联网的综合能效评估边界示意图如图1所示，所包含的元素应涵盖：分布式电源、配电网、热力网、储能系统和负荷。



1.2 指标体系

为确保综合能效评估的科学性、合理性及适用性,确定评估指标原则和方向。综合能效评估指标体系应能全面真实反映综合能源系统能效水平,以现行国家、行业有关标准以及相关设计手册^[14-23]为评估标准,全方位综合考虑,保证指标体系的均衡性与完整性。构建指标体系时遵循以下原则^[24]:

1) 指标宜少不宜多, 宜简不宜繁。指标体系应包括可以达到评价目的的基本内容, 能反映评价对象的全部信息。

2) 指标应有独立性。每个指标要内涵清晰, 相对独立, 同一层次的各项指标间不存在因果关系。

3) 指标应具有代表性。能很好反映研究对象某方面的特性, 指标应可行, 符合客观实际水平, 易于操作, 即具有可测性。

能源互联网以分布式可再生能源为主要一次能源^[24]，所以为体现分布式能源的作用，综合能效评估指标体系方案层应该包括分布式电源发电量占比与分布式电源容量占比。由于水力不平衡会造成空调系统冷、热媒流量分配失衡，某些环路流量过剩，而某些环路流量不足，所以热力网方案层指标中包含管网水力平衡度指标。系统补水率和管网热损失率直接反映冷热量的损失程度，系统耗电输热比反映热网输配系统的合理配置水平。储能系统主要有储电和储热两类，方案层指标有电储能系统能量效率和储热系统效率。负荷主要指各类可以实现电热转换的末端负荷，对应的方案层指标为CCHP一次能源综合利用效率、CCHP年平均能源综合利用效率、平均锅炉热效率和冷水（热泵）机组效率。除了上述各类冷热源有关的指标外，空调系统末端能效比可以反映末端送风系统的能效水平，PPD指数代表房间舒适度水平，能够间接反映系统能效。

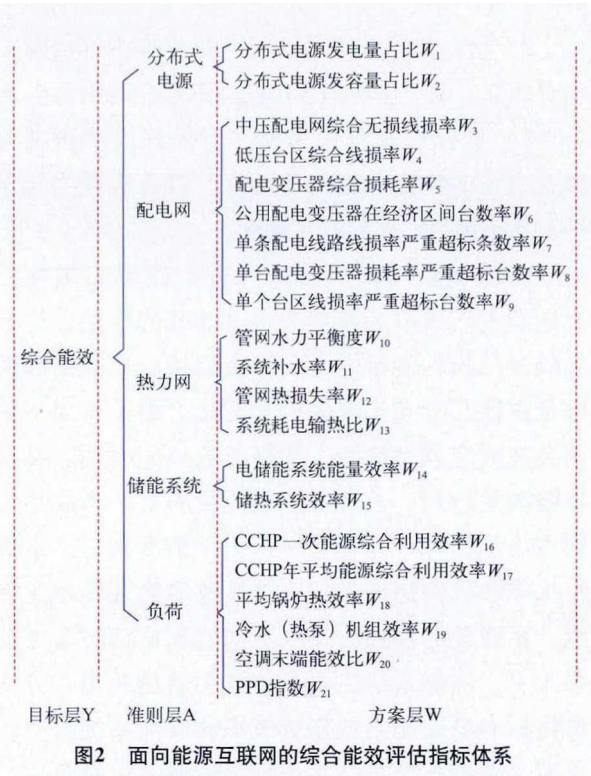
根据层次分析法原理分层建立面向能源互联网的综合能效评估指标体系, 层次分析模型分为三层, 分别为目标层、准则层和方案层, 层次结构如图2所示。

2 评估模型

2.1 构造判断矩阵

层次分析法的基础信息是对于每一层次中各要素的相对重要性给出判断，同时要对要素进行适当的标度，构造的判断矩阵为正反矩阵，判断矩阵应有如下形式

$$\begin{array}{c|cccc} B_k & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \hline C_1 & C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_2 & C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{array} \quad (1)$$



判断矩阵有如下性质

$$\begin{cases} C_{ij} > 0 \\ C_{ij} = 1 / C_{ji} \quad i \neq j \\ C_{ii} = 1 \quad i = j \end{cases} \quad (2)$$

应用“1-9标度方法”使判断决策定量化，判断矩阵标度及含义如表1所示。

重要性等级	C_{ij} 赋值
两个元素相比，具有同样重要性	1
两个元素相比，前者比后者稍重要	3
两个元素相比，前者比后者明显重要	5
两个元素相比，前者比后者强烈重要	7
两个元素相比，前者比后者极端重要	9
上述相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8

若元素*i*与元素*j*的重要性之比为 C_{ij} ，元素*j*与元素*i*重要性之比 C_{ji} 为 $1/C_{ij}$ 。

2.2 层次总排序

构造判断矩阵后首先进行层次单排序，层次单排序即根据判断矩阵计算对于上一层元素而言，本层次与之有联系的元素重要性次序的权值^[24]。判断矩阵的特征向量作归一化处理即为指标权重向量，指标判断矩阵的构建是对人的主观判断进行形

式化的表达，与客观的指标之间的重要程度存在误差，因此需要对判断矩阵做一致性校验。

度量判断矩阵偏离一致性的指标CI计算公式为

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

式中， $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根；*n*为判断矩阵的阶。

随机一致性比率CR计算公式为

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

式中，RI为平均随机一致性指标，取值如表2所示。

表2 平均随机一致性指标									
<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当CR<0.1时，即认为所构造的判断矩阵具有一致性，否则就需要调整判断矩阵，直到使其满足一致性。层次单排序结束后进行层次总排序，以获得最底层各指标对于总目标的排序权重，层次总排序也需进行一致性检验，检验方法与层次单排序的一致性检验方法相同。

2.3 评估模型

由各项评估指标的评估数值和权重系数求得综合评估值，评估模型为

$$Y = WX \quad (5)$$

式中，Y为综合评估值；W为评估指标的权向量；X为评估指标评估数值向量。

评估指标分三类：正指标类，数值越大能效水平越高；逆指标类，数值越小能效水平越高；适度指标类，数值适中能效水平较高。进行评估时需要将上述不同类型的指标进行无量纲化处理。

分布式电源发电量占比计算公式为

$$\lambda = 100\% \times E_f / E_0 \quad (6)$$

式中， λ 为分布式电源发电量占比； E_f 为分布式电源发电量，kW·h； E_0 为用户总电量，kW·h。

分布式电源容量占比计算公式为

$$\lambda' = 100\% \times P_f / P \quad (7)$$

式中， λ' 为分布式电源容量占比； P_f 为分布式电源装机容量，kW；P为负荷总量，kW。

中压配电网综合无损线损率计算公式为

$$\phi_{zy} = 100\% \times (E_g - E_s) / E_g \quad (8)$$

式中, ϕ_{zy} 为中压配电网综合无损线损率; E_g 为中压无损供电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_s 为中压无损售电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

低压台区综合无损线损率计算公式为

$$\phi_{dy} = 100\% \times (E_{pb} - E_{yh}) / E_{pb} \quad (9)$$

式中, ϕ_{dy} 为低压台区综合无损线损率; E_{pb} 为配电变压器低压侧总电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_{yh} 为低压末端用户电表电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

配电变压器综合损耗率计算公式为

$$\phi_{pb} = 100\% \times (E_{gy} - E_{dy}) / E_{gy} \quad (10)$$

式中, ϕ_{pb} 为配电变压器综合损耗率; E_{gy} 为配电变压器高压侧电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_{dy} 为配电变压器低压侧电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

公用配电变压器在经济区间台数率计算公式为

$$\mu = 100\% \times k / k_0 \quad (11)$$

式中, μ 为公用配电变压器在经济区间台数率; k 为载荷在经济区间的公用配电变压器台数, 台; k_0 为公用配电变压器总台数, 台。

单条配电线路线损率严重超标条数率计算公式为

$$\varphi = 100\% \times m / m_0 \quad (12)$$

式中, φ 为单条配电线路线损率严重超标条数率; m 为单条线路线损率超标线路条数, 条; m_0 为中压线路条数, 条。

单台配电变压器损耗率严重超标台数率计算公式为

$$\varphi_{pb} = 100\% \times n / n_0 \quad (13)$$

式中, φ_{pb} 为单台配电变压器损耗率严重超标台数率; n 为单台配电变压器损耗率超标台数, 台; n_0 为公用配电变压器台数, 台。

单个台区线损率严重超标台数率计算公式为

$$\varphi_{iq} = 100\% \times a / a_0 \quad (14)$$

式中, φ_{iq} 为单个台区线损率严重超标台数率; a 为单台区线损率严重超标台数, 台; a_0 为公用配电变压器台数, 台。

管网水力平衡度计算公式为

$$HB_j = G_{wmj} / G_{wdj} \quad (15)$$

式中, HB_j 为第 j 个热力入口的水力平衡度; G_{wmj} 为第 j 个热力入口循环水量实际值, m^3/s ; G_{wdj} 为第 j 个热力入口循环水量设计值, m^3/s 。

管网水力平衡度评价基准: 水力平衡度为0.9~1.2。

系统补水率计算公式为

$$R_{mp} = 100\% \times g_a / g_d \quad (16)$$

式中, R_{mp} 为系统补水率; g_a 为系统单位设计循环水量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; g_d 为系统实际单位补水量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

系统补水率评价基准: 一次网系统补水率不大于0.5%, 二次网系统补水率不大于1.0%。

管网热损失率计算公式为

$$\alpha_{ht} = (1 - \sum Q_j / Q_a) \times 100\% \quad (17)$$

式中, α_{ht} 为管网热损失率; Q_j 为第 j 个热力入口处的供热量, MJ ; Q_a 为热源输出热量, MJ 。

管网热损失率评价基准: 管网热损失率不大于10%。

系统耗电输热比计算公式为

$$EHR = N / Q\eta_{sb} \quad (18)$$

式中, EHR 为系统耗电输热比; N 为水泵在设计工况点的轴功率, kW ; Q 为建筑供热负荷, kW ; η_{sb} 为水泵总效率。

评价基准计算公式为

$$EHR \leq 0.0056 \times (14 + \alpha \sum L) / \Delta t \quad (19)$$

式中, Δt 为设计供回水温差, $^{\circ}\text{C}$; L 为室外主干线总长度, m ; α 为不同主干线长度对应的系数。

电储能系统能量效率计算公式为

$$\eta_{ed} = 100\% \times E_D / E_c \quad (20)$$

式中, E_D 为放电能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_c 为充电能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

电储能系统能量效率评价基准: 锂离子电池为90%~94%, 铅酸电池为75%~90%, 全钒液流电池为65%~70%。

储热系统效率计算公式为

$$\eta_{\alpha} = 100\% \times Q_{disch} / Q_{charge} \quad (21)$$

式中, Q_{disch} 为释热量, MJ ; Q_{charge} 为蓄热量, MJ 。

储热系统效率评价基准: 储热系统效率不小

于90%。

CCHP年平均能源综合利用效率计算公式为

$$\nu=100\% \times (3.6E+Q_1+Q_2)/(B \cdot Q_L) \quad (22)$$

式中， ν 为年平均能源综合利用效率； E 为年净输出电量，kW·h； Q_1 为年有效供热利用余热总量，MJ； Q_2 为年有效供冷利用余热总量，MJ； B 为年天然气消耗总量， m^3 ； Q_L 为天然气低位热值，MJ/ m^3 。

评价基准：CCHP年平均能源综合利用效率不小于0.7。

CCHP一次能源综合利用效率计算公式为

$$\zeta=100\% \times (3.6E+Q_h+Q_c)/(B \cdot Q_L+3.6E/\eta_{cc}) \quad (23)$$

式中， ζ 为CCHP一次能源年综合利用效率； Q_h 为供热量，MJ； Q_c 为供冷量，MJ； η_{cc} 为供电效率。

评价基准：CCHP一次能源综合利用效率不小于89.8%。

平均锅炉热效率计算公式为

$$\eta_{bl}=100\% \times Q_a/Q_i \quad (24)$$

式中， η 为平均锅炉热效率； Q_a 为锅炉供热量，MJ； Q_i 为锅炉输入热量，MJ。

平均锅炉热效率评价基准详见文献[18]。

冷水（热泵）机组效率计算公式为

$$cop=Q_n/N_o \quad (25)$$

式中， cop 为冷水（热泵）机组效率； Q_n 为制冷（热）量，kW； N_o 为消耗总电功率，kW。

评价基准详见文献[22]。

PPD指数计算公式为

$$PPD=100-95 \times e^{-(0.033\,53 \times PMV^4+0.217\,9 \times PMV^2)} \quad (26)$$

式中， PMV 为预计处于热环境中的群体对于热感觉投票的平均值。

评价基准详见文献[19]。

3 算例分析

对于实际统计数据可涵盖上述所有评价指标的情况，应用层次分析法对判断矩阵分别进行层次单排序和总排序，并进行一致性检验，最终总排序权重结果如表3所示。

总排序一致性比例 $CR=0.079\,3$ ， $CR<0.1$ ，满足一致性要求。单排序计算结果略，单排序结果一致性比例 CR 均小于0.1，满足一致性要求。综

表3 总排序表

指标	权重	指标	权重	指标	权重
W_1	0.053	W_8	0.012	W_{15}	0.054
W_2	0.008	W_9	0.063	W_{16}	0.046
W_3	0.064	W_{10}	0.016	W_{17}	0.068
W_4	0.051	W_{11}	0.078	W_{18}	0.020
W_5	0.016	W_{12}	0.196	W_{19}	0.032
W_6	0.117	W_{13}	0.033	W_{20}	0.006
W_7	0.040	W_{14}	0.018	W_{21}	0.007

合能效评估和按照表3中的权重计算结果进行。

考虑到实际案例可用的实际统计数据无法涵盖上述全部评价指标，因此选取其中部分指标进行综合能效评估。对A和B两个科技园区的能源系统进行运行能效比较，有关指标实际值及评价基准值如表4所示。

表4 能效相关指标值

指标	A区实际值 (%)	B区实际值 (%)	评价基准 (%)
分布式电源发电量占比	28.5	26.3	30
低压台区综合无损线损率	3.56	3.58	10
管网热损失率	4.88	5.22	10
储热系统效率	84.7	85.2	90
CCHP年平均能源综合利用效率	54.6	83.2	70

准则层权重计算结果如表5所示。

表5 准则层排序

准则层构成	权重	一致性检验
分布式电源	0.060 7	一致性指标 $CI=0.028\,7$ ； 一致性比例 $CR=0.025\,6$ ； $CR<0.1$ ，满足一致性要求。
配电网	0.363 3	
热力网	0.323 1	
储能系统	0.072 4	
负荷	0.180 5	

采用指数化变换方法对表4指标值进行无量纲化变换，变换后的数乘以100为评估的分值结果，评估结果如表6所示。

由评估结果可知，A科技园区能源系统运行综合能效评分为66.6分，B科技园区能源系统运行综合能效评分为72.4分。B园区运行综合能效略大于A园区，二者的低压台区综合无损线损率和储热系统效率基本相同，B区管网热损失率较A区略大，B区分布式电源发电量占比偏小，但是B区CCHP

表6 综合能效评估结果

指标	A区评估 分值结果	B区评估 分值结果
分布式电源发电量占比	95.0	87.6
低压台区综合无损线损率(%)	64.4	64.2
管网热损失率(%)	51.2	47.8
储热系统效率(%)	94.1	94.6
CCHP年平均能源综合利用效率(%)	78	89
综合能效评分	66.6	72.4

年平均能源综合利用效率大于A区。可以看出，B区综合能效比A区综合能效高的原因是CCHP年平均能源综合利用效率较高。虽然B区分布式电源发电量占比较低，但是由于该项指标权重较低，所以对综合能效影响较小。要提高整个系统能效，对于A园区能源系统，可首先对CCHP能源系统开展进一步的数据分析和运行优化；对于B园区能源系统，应该针对系统热力管网开展分析调查，降低管网热损失率，以进一步提高能源系统综合能效。

4 结束语

本文结合能源互联网的能源生产、传输和消费特征，建立了涵盖配电网、热力网和负荷等能源互联网关键元素的综合能效评估体系，设计基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法，能够对能源系统的综合能效进行量化评估，可应用于分析计算能源互联网项目综合能效，综合能效评估结果有一定的工程参考价值。

参考文献

[1] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运行模式及关键技术初探 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (3) : 681-691.

[2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (10) : 1-8.

[3] 陈飞翔, 胥建群, 王晨杨, 等. 能源互联网系统用户侧冷热负荷预测模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (14) : 3678-3684.

[4] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (14) : 3482-3494.

[5] Fumo N, Mago P J, Chamra L M. Cooling, heating, and power energy performance for system feasibility [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2008, 222 (4) : 347-354.

[6] Rosen M A, Le M N, Dincer I. Exergetic analysis of cogeneration-based district energy systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power & Energy, 2004, 218 (6) : 369-375.

[7] Hammond G P, Stapleton A J. Exergy analysis of the United Kingdom energy system [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power & Energy, 2001, 215 (2) : 141-162.

[8] Petrov A Y, Zaltash A, Labinov S D. Evaluation of different efficiency concepts of an integrated energy system (IES) [J]. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2004: 347-355.

[9] Cooper S, Hammond G P, Mcmanus M C. Thermodynamic efficiency of low-carbon domestic heating systems: heat pumps and micro-cogeneration [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power & Energy, 2013, 227 (1) : 18-29.

[10] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (1) : 1-13.

[11] Mancarella P. An overview of concepts and evaluation models [J]. Energy, 2014, 65 (2) : 1-17.

[12] Cartes D, Ordonez J, Harrington J, et al. Novel integrated energy systems and control methods with economic analysis for integrated community based energy systems [C]. IEEE Power Engineering

Society General Meeting, 2007: 1-6.

[13] van Beuzekom I, Mazairac L A J, Gibescu M. Optimal design and operation of an integrated multi-energy system for smart cities [C]. IEEE International Energy Conference, 2016.

[14] GB/T 13462—2008 电力变压器经济运行 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[15] GB/T 31367—2015 中低压配电网能效评估导则 [S].

[16] GB/T 26194—2010 蓄冷系统性能测试方法 [S].

[17] JGJ/T 132—2009 居住建筑节能检测标准 [S].

[18] GB/T 50627—2010 城镇供热系统评价标准 [S].

[19] GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设

计规范 [S].

[20] GB/T 17981—2007 空气调节系统经济运行 [S].

[21] NB/T 33016—2014 电化学储能系统接入配电网测试规程 [S].

[22] GB 19577—2004 冷水机组能效限定值及能源效率等级 [S].

[23] 林世平, 李先瑞, 陈斌. 燃气冷热电分布式能源技术应用手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[24] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(收稿日期: 2017-02-24) **EA**

(上接第56页)

和电容 C_4 容值大小, 其 RC 串联电路时间常数为

$$RC = (240 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}) s = 2.4 s \quad (8)$$

电容 C_4 初始电压为0 V, 根据电容 C_4 电压和时间 t 的关系表达式 (6) 可知不同时刻的电压, 结果如表2所示。

表2 电容 C_4 电压与时间的关系

时间/ms	C_4 电容电压/V
30	0.149
50	0.247
70	0.345
90	0.442
110	0.538
130	0.633
150	0.727
300	1.410
320	1.498

由表2可知, 经过150 ms, 电容 C_4 电压为0.727 V; 经过320 ms, 电容 C_4 电压为1.498 V, 考虑到电容 C_4 触发晶闸管时1N4148二极管上会有0.7 V左右的压降, 且晶闸管MCR100-8控制极的触发电压为0.8 V。因此当电容 C_4 电压达到1.5 V时触发MCR100-8晶闸管, 脱扣器线圈产生的瞬时吸力推动铁心冲击自由脱扣机构的锁扣, 使得微型断路器分闸, 实测欠电压分断时间如表3所示。

表3 欠电压动作时间试验记录

电压/V	合闸分闸速度快慢	分断时间大小/ms		
155	慢速	599	579	569
	快速	308	302	296
140	慢速	476	486	418
	快速	243	245	241
120	慢速	332	191	266
	快速	134	123	114
100	慢速	384	228	230
	快速	130	119	113

3 结束语

本文分析了微型断路器过欠电压保护附件的原理, 并在此基础上结合 RC 串联电路计算过欠电压保护的分断时间, 选择合适的 RC 时间常数使得过欠电压保护的分断时间在100 ms以上。避免复杂的应用环境下, 如电网电压出现瞬时尖峰脉冲, 或者感性负载起动瞬间电网电压暂降情况下产品的误动作, 该过欠电压附件的设计思路可以为相关产品的设计提供一定参考。

参考文献

[1] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[2] 刘德胜, 郎文庆, 叶文利, 等. 浅谈提高漏电断路器性能的试验及措施 [J]. 低压电器, 2009, 19 (4): 62. (收稿日期: 2017-01-17) **EA**