

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-581-07

重庆某江水源热泵性能影响因素分析

吴 杰 李妤姝 卢 军

(重庆大学 重庆 400045)

【摘 要】 以重庆市某能源站为研究对象, 该能源站服务片区处于分期阶段, 通过分析了 20%、50%、80% 与 100% 四种开发规模对系统蓄冰/蓄热优先和机组优先运行模式的影响, 分别制定在各工况、各运行模式下供暖季和供冷季的运行策略。结果表明: 总规模一定时, 该系统在各运行模式下, 冬、夏季系统电耗量、运行费和峰、谷段电耗均随开发规模的加大而增加, 且成线性相关, 相对于机组优先运行, 每增加 1% 开发规模, 蓄冰/蓄热优先运行模式电耗量增加率减少 0.38%, 运行费节省率减少 0.13%, 单位电耗费用节省率减少 0.29%, 移峰电量率减少 0.27%, 谷电利用率减少 0.55%。该结论对后续该片区的建设中系统的运行策略具有现实的指导意义。

【关键词】 开发规模; 蓄冰/蓄热优先; 机组优先; 运行策略
中图分类号 TU831.7 文献标识码 A

Analysis of Factors Affecting the Performance of a Water Source Heat Pump in a River in Chongqing

Wu Jie Li Yushu Lu Jun

(Chongqing university, Chongqing, 400045)

【Abstract】 Taking an energy station in Chongqing as a research object, the service area of the energy station is in a staged phase. Through analysis of the development scales of 20%, 50%, 80%, and 100%, the impact of the four development scales on the system's ice / heat storage priority operation and unit priority operation modes are to formulate operating strategies for the heating season and the cooling season under each operating condition and operating mode. The results show that when the total scale is constant, the system's power consumption, operating costs, peak and valley power consumption in winter and summer under each operating mode increase with the development scale, and are linearly related. Relative to the priority operation of the unit, for each 1% increase in the development scale, the power consumption increase rate of ice storage / heat storage priority operation mode decreases by 0.38%, the operating cost savings rate decreases by 0.13%, and the unit power consumption cost savings rate decreases by 0.29%, the electricity rate decreased by 0.27%, and the valley electricity utilization rate decreased by 0.55%. This conclusion has practical guiding significance for the subsequent system operation strategy in the construction of this area.

【Keywords】 Development scale; Ice / Heat storage priority; Unit priority; Operating strategy

作者简介: 吴 杰 (1995.11-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 6917012467@qq.com
通讯作者: 卢 军 (1966.10-), 男, 博士, 教授, E-mail: 1181367768@qq.com
收稿日期: 2019-11-29

0 引言

随着社会经济的快速发展, 我国能源的短缺与人们对于能源不断增长的需求之间的矛盾日益严峻, 其中尤为严重的为用电负荷的不断攀升, 我国

现阶段所存在的缺电现象, 并不是电量供应的不足, 而是电力的匮乏, 同时电网用电高峰与低谷之间的差距与日俱增, 用电的调峰问题日益严重。据统计, 建筑能耗约占世界总能耗的 1/3, 而空调是各国住

宅、行政、商业和工业建筑中最常见的能源消耗设备。目前，以化石燃料计算，约有 75% 的一次能源供应于建筑供暖和制冷，尤其是热带地区，约 60% 的电力消耗都与空调系统有关^[1]。由于空调系统与人们的日常生活息息相关，因此在不影响室内人们正常办公与生活的前提下，通过储能的技术手段在电价处于谷值时将电能存储起来以便在电价处于峰值的时间段内使用，以达到“削峰填谷”的功能，在诸多蓄能系统中，冰蓄冷与水蓄热系统具有成本较低、占地较少的优点而愈发受到人们的关注^[2-7]，本文以重庆某能源站已有的冰蓄冷/水蓄热+江水源热泵联合运行的空调系统作为研究对象，由于该能源站所服务区域仍处于开发阶段，因此在已有的运行策略上，分析了不同的能源站开发规模对该系统经济与能耗的各项指标的影响，对后期运行策略的调控具有指导意义。

1 工程概况

1.1 建筑概况

本文以 1 号能源站作为研究对象规划图如图 1 所示。该能源站服务片区属于分期开发阶段。该站供能区域建筑面积约为 244.38 万 m²，主要包含金融保险业用地 (214.76 万 m²)、商业用地 (17.31 万 m²)、旅馆业用地 (8 万 m²) 及游乐业用地 (4.31 万 m²)。



图 1 某能源站服务区规划图

Fig.1 Service area plan of an energy station

1.2 机组概况

利用 Dest 模拟软件得到该区域最大冷负荷为 193801kW，最大热负荷为 85679kW。该能源站供冷方式为江水源热泵+冰蓄冷复合系统，以江水作

为热泵机组冷却水，冰蓄冷系统为外融冰形式；供热方式采用江水源热泵+水蓄热复合系统。能源站内共设有 10 台制冷量与制热量分别为 8406kW 与 8650kW 的热泵机组；8 台双工况机组，制冷量为 8546kW/台，制冰量为 5067kW/台；蓄冰装置最大蓄冷量为 323180kW·h。夏季，江水侧制冷时供、回水温度为 27°C/37°C，制冰时供、回水温度为 27°C/33°C，系统原理图如图 2 所示；冬季供暖用户侧供、回水温度为 45°C/37°C，江水侧供、回水温度为 10°C/3°C，系统原理图如图 3 所示。

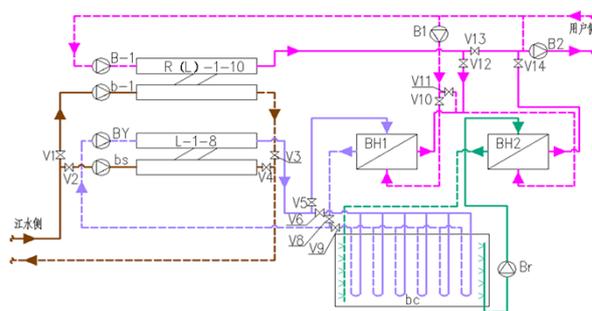


图 2 夏季供冷系统原理图

Fig.2 Summer cooling system schematic diagram

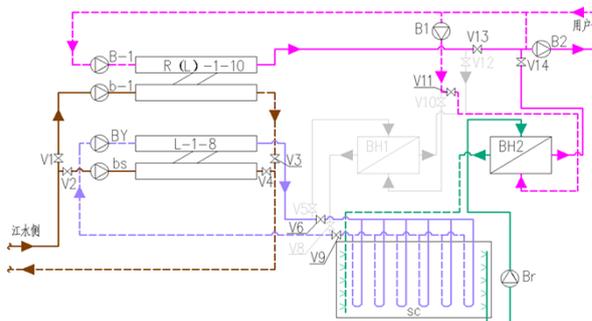


图 3 冬季供暖系统原理图

Fig.3 Winter heating system schematic diagram

1.3 系统参数

评价系统经济与节能程度的指标主要有电耗、运行费、单位电耗费用以及移峰填谷能力等多项指标。

其中移峰电量率与谷电利用率为衡量系统移峰填谷能力的两项指标，二者计算公式分别如公式

(1) 与公式 (2) 所示。

$$\delta = 1 - P_{ih} / P_{ch} \tag{1}$$

式中： P_{ih} 为蓄热优先运行下高峰时段耗电量，kWh； P_{ch} 为机组优先运行下高峰时段耗电量，kWh。

$$\delta = P_{id} / P \tag{2}$$

式中： P_{id} 为系统用电低谷时耗电量，kWh； P

为总耗电量, kWh。

2 不同开发规模下运行策略分析

该能源站的服务片区处于分期开发阶段,本项目中定义整片区域完全开发状态为100%开发规模,完全未开发状态为0开发规模,因此本区域的开发规模处于0与100%之间(包含0与100%)。为简化模拟的工作量,选取100%、80%、50%与20%这四种典型开发规模为研究对象,开发规模的大小在建筑中以冷热负荷的不同的形式展现。在每种开发规模下研究四种典型冷热负荷率(100%负荷、80%负荷、50%负荷和20%负荷),在不同负荷率下实行蓄冰/蓄热优先运行与机组优先运行两种不同的运行策略,通过对比得出该区域不同开发阶段的最佳运行策略。

2.1 100%开发规模下的运行策略

(1) 蓄冰/蓄热优先运行策略

当该区域处于完全开发阶段(开发规模为100%),夏季蓄冰优先运行策略如图4所示。

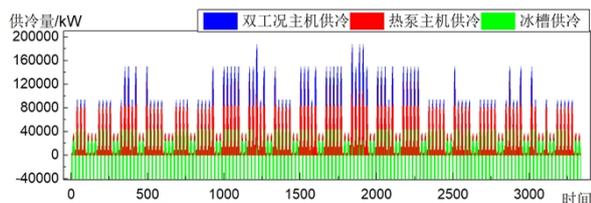


图4 100%开发规模下夏季蓄冰优先运行策略

Fig.4 Summer ice storage priority operation strategy under 100% development scale

由图4可知,当开发规模为100%时,蓄冰优先运行模式下,供冷季供冷量按照7天为一周期的规律变化,工作日的供冷量相较于周末有明显的增长,这是由于该片区建筑中绝大部分均为办公建筑。在该开发规模下,蓄冰槽在夜间基本处于满负荷蓄冰模式;在7~8月,除了使用蓄冰与热泵主机供冷,大量双工况的主机也被开启以补充所需要的冷量,其余月份只需开启少量双工况机组即可满足要求。

冬季蓄热优先运行策略如图5所示。由图可知,同理于夏季蓄冰优先运行的策略,供暖季也呈现出7天为一个周期、周末供热量低的规律。除了12月上旬的阶段昼间仅开启水槽供热,夜间开启热泵机组供热即可满足要求,其余月份昼间均要开启大量机组与水槽联合运行以满足供暖的要求,夜间水槽也在绝大部分时间内处于满负荷运行状态。

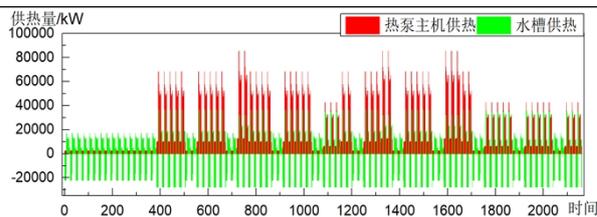


图5 100%开发规模下冬季蓄热优先运行策略

Fig.5 Winter heat storage priority operation strategy under 100% development scale

(2) 机组优先运行策略

在100%的开发规模下,夏季机组优先运行策略如图6所示。机组大体可满足供冷季的冷量需求,冷量基本全由热泵主机提供,7~8月份份冷负荷较大,需要开启大量双工况主机联合供冷,极少情况下需开启冰槽补充供冷。供暖季由于所需热负荷较少,因此仅开启热泵主机即可满足供暖的要求,无需开启双工况主机和水槽补充蓄热。

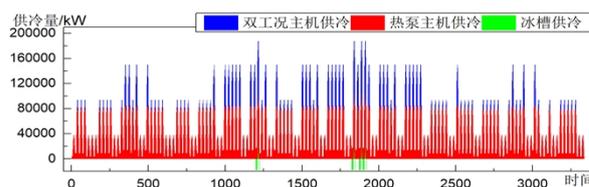


图6 100%开发规模下夏季机组优先运行策略

Fig.6 Priority operation strategy of summer unit under 100% development scale

2.2 80%开发规模下的运行策略

(1) 蓄冰/蓄热优先运行策略

80%开发规模下,蓄冰与蓄热优先运行策略如图7与图8所示,运行策略类似于100%开发规模下的策略,冰槽在夏季夜间处于满负荷蓄冰模式;供冷季以冰槽与热泵主机为主,当冷负荷较大时,需开启双工况主机供冷,具体台数由所需冷量大小确定。冬季周一至周五热负荷较大,大量热泵主机应开启来补充热量,其余时间段均以水槽供热为主。

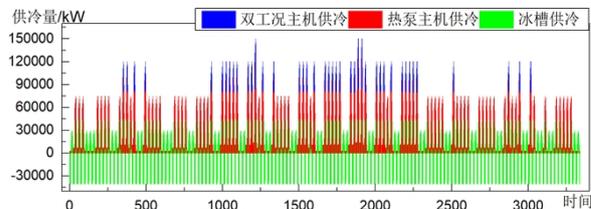


图7 80%开发规模下夏季蓄冰优先运行策略

Fig.7 Summer ice storage priority operation strategy under 80% development scale

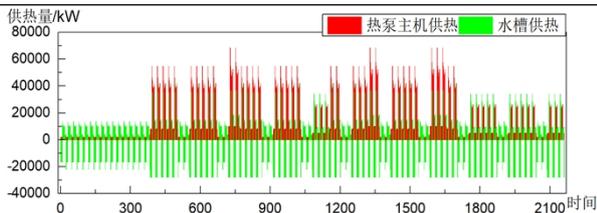


图 8 80%开发规模下冬季蓄热优先运行策略

Fig.8 Winter heat storage priority operation strategy under 80% development scale

(2) 机组优先运行策略

80%开发规模下夏季机组优先运行策略见图9。供冷季以热泵主机为主，冷负荷较大的月份需开启双工况主机补充供冷。供暖季同 100%开发规模相同，仅开启热泵主机即可满足供暖。

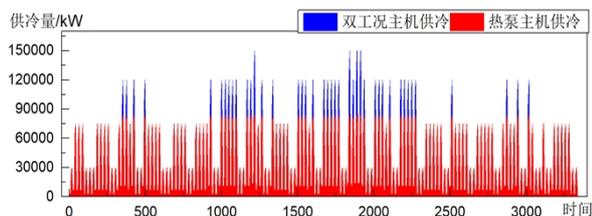


图 9 80%开发规模下夏季机组优先运行策略

Fig.9 Priority operation strategy of summer unit under 80% development scale

2.3 50%开发规模下的运行策略

(1) 蓄冰/蓄热优先运行策略

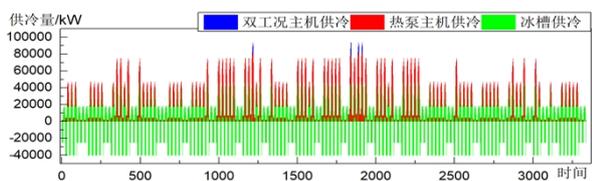


图 10 50%开发规模下夏季蓄冰优先运行策略

Fig.10 Summer ice storage priority operation strategy under 50% development scale

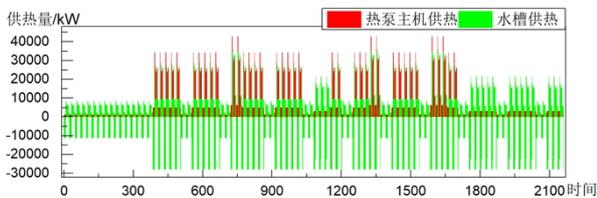


图 11 50%开发规模下冬季蓄热优先运行策略

Fig.11 Winter heat storage priority operation strategy under 50% development scale

50%开发规模下，蓄冰与蓄热优先模式运行策略如图 10 与图 11 所示。在此开发程度下，无论夏

季与冬季双工况机组均很少被使用，周末仅需开启冰槽/水槽即可满足供冷/供暖的要求，周一至周五工作日期间，大部分冷/热量由冰槽与水槽提供，额外的少部分冷/热量通过开启部分热泵机组补充。

(2) 机组优先运行策略

在 50%的开发规模下，夏季机组优先运行策略见图 12。供冷季和供暖季均开启热泵主机供能，仅需在夏季极少天气开启少量双工况主机供冷。

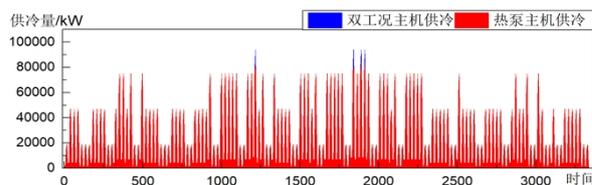


图 12 50%开发规模下夏季机组优先运行策略

Fig.12 Priority operation strategy of summer unit under 50% development scale

2.4 20%开发规模下的运行策略

(1) 蓄冰/蓄热优先运行策略

当开发规模为 20%时，蓄冰/蓄热优先策略如图 13 与图 14 所示。供冷与供暖季夜间均采用热泵供能；昼间则采用冰槽/水槽供能，夏季少数几天需开启少数热泵主机进行辅助供冷；夜间冰槽/水槽蓄能量的大小呈现周期性变化，周末蓄能量较低，工作日蓄能量较大。

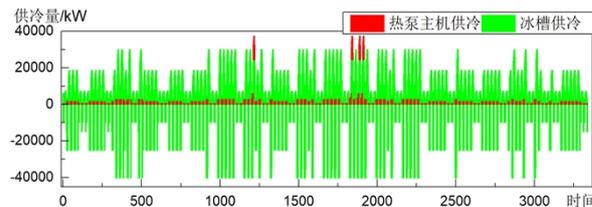


图 13 20%开发规模下夏季蓄冰优先运行策略

Fig.13 Summer ice storage priority operation strategy under 20% development scale

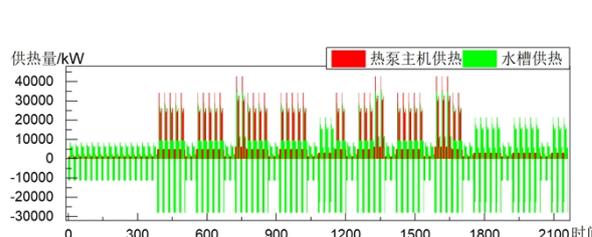


图 14 20%开发规模下冬季蓄热优先运行策略

Fig.14 Winter heat storage priority operation strategy under 20% development scale

(2) 机组优先运行策略

20%开发规模下,机组优先运行模式在供冷季和供暖季均采用热泵主机供能即可,供能量以7天为周期呈现规律性,同前文。

根据上述不同开发规模下的运行策略得到各不同工况下的系统运行参数,并计算出了各工况下蓄冰/蓄热优先运行模式相对于机组优先运行模式下的各指标节省率。具体如表1与表2所示。

3 不同开发规模下系统参数对比

表1 不同开发规模下系统运行参数(1)

Table1 System operating parameters under different development scales (1)

指标	时段	100%开发规模			80%开发规模		
		蓄冰/蓄热优先	机组优先	节省率/%	蓄冰/蓄热优先	机组优先	节省率/%
电耗/kWh	夏季	37294604.88	32168418.08	-15.94	30797738.49	25526955.02	-20.65
	冬季	11088171.52	10415342.42	-6.46	8962153.24	8325830.51	-7.64
	冬夏	48382776.40	42583760.49	-13.62	39759891.73	33852785.53	-17.45
运行费/万元	夏季	2142.73	2427.58	11.73	1670.14	1931.97	13.55
	冬季	774.76	1031.64	24.90	589.96	824.68	28.46
	冬夏	2917.48	3459.22	15.66	2260.10	2756.65	18.01
单位电耗费用/(元/kWh)	夏季	0.57	0.75	23.87	0.54	0.76	28.35
	冬季	0.70	0.99	29.46	0.66	0.99	33.54
	冬夏	0.60	0.81	25.77	0.57	0.81	30.19
峰段/kWh	夏季	5351304.24	11396989.70	53.05	3547633.81	9096226.36	61.00
	冬季	1178561.81	4014005.93	70.64	649204.38	3209583.40	79.77
	冬夏	6529866.05	15410995.63	57.63	4196838.18	12305809.77	65.90
谷段/kWh	夏季	14847634.71	2252386.80	39.81	14364425.14	1677251.37	46.64
	冬季	5445084.23	1108901.47	49.11	4936359.75	887115.49	55.08
	冬夏	20292718.94	3361288.27	41.94	19300784.89	2564366.86	48.54

表2 不同开发规模下系统运行参数(2)

Table2 System operating parameters under different development scales (2)

指标	时段	50%开发规模			20%开发规模		
		蓄冰/蓄热优先	机组优先	节省率/%	蓄冰/蓄热优先	机组优先	节省率/%
电耗/kWh	夏季	20119203.86	15838340.47	-27.03	9741097.89	6322914.21	-54.06
	冬季	5787635.31	5206916.00	-11.15	2466242.79	2078123.37	-18.68
	冬夏	25906839.17	21045256.46	-23.10	12207340.67	8401037.57	-45.31
运行费/万元	夏季	984.24	1199.32	17.93	385.44	478.78	19.49
	冬季	333.79	515.73	35.28	122.83	205.82	40.32
	冬夏	1318.03	1715.05	23.15	508.27	684.59	25.76
单位电耗费用/(元/kWh)	夏季	0.49	0.76	35.40	0.40	0.76	47.74
	冬季	0.58	0.99	41.77	0.50	0.99	49.71
	冬夏	0.51	0.81	37.57	0.42	0.81	48.91
峰段/kWh	夏季	1541889.62	5666557.24	72.79	537835.27	2262593.96	76.23
	冬季	280557.96	2006491.99	86.02	112221.63	800860.11	85.99
	冬夏	1822447.58	7673049.23	76.25	650056.90	3063454.07	78.78
谷段/kWh	夏季	11824075.79	1048339.82	58.77	8292871.98	419269.11	85.13
	冬季	4141023.00	554452.75	71.55	2206121.52	221790.01	89.45
	冬夏	15965098.80	1602792.56	61.63	10498993.49	641059.11	86.01

各参数变化趋势如图 15 所示。由图可知，在不同的运行模式下，供冷季与供暖季系统的各项参数随着开发规模的增大而增大，且各参数的变化规律几乎均为线性变化。其中，相对于峰段与谷段的耗电量增长速率，各运行策略下两季电耗与运行费用的数值更大，增长速率更快。在能耗与电费方面，蓄冰/蓄热优先模式下的耗电量显著大于机组优先运行模式，然而由于峰谷电价的原因，其运行费用显著低于机组优先运行模式；在移峰填谷方面，由于需要夜间蓄冰/蓄热，因此蓄冰/蓄热优先模式下夜间（谷段）用电量远高于机组优先运行模式，而昼间用电高峰期用电量远低于机组优先运行模式，且差值随开发规模的增大而增大。

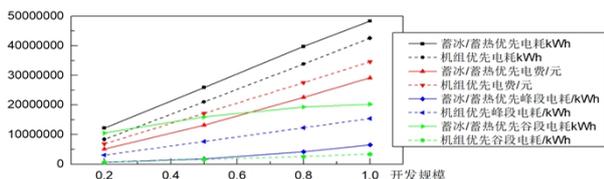


图 15 各开发规模下冬夏季系统参数对比

Fig.15 Comparison of winter and summer system parameters at various development scales

相对于机组优先运行的模式，两季中采用蓄冰/蓄热优先运行模式下各个指标参数的节省率如图 16 所示。从图中轻易可以看出，电耗的节省率为负值，即采用蓄冰/蓄热优先模式并不能节约用电，相反会使耗电量增加，然而耗电量的增长随开发规模的逐渐增大而降低。在 20% 的开发规模下，两季采用蓄冰/蓄热优先运行的模式下，总耗电量增加率为 45.31%，其中夏季增长 54.06%，冬季增长 18.68%；当开发规模达到 100% 时，两季蓄冰/蓄热优先运行耗电量增率为 13.62%，其中夏季增长率为 15.94%，冬季增长率为 6.46%；导致这个现象的主要原因为为该片区域对冷负荷需求较大，因此夏季在冰槽中应有更多的能量被储备，因此也需要消耗更多的电量来将冷量进行释放。通过计算得知，每增加 1% 的开发规模，蓄冰/蓄热优先运行模式相对于机组优先运行模式电耗量增加率降低 0.38%。

相对于机组优先运行的模式，两季中采用蓄冰/蓄热优先运行模式下总运行费用与单位电耗费用均将低，然而两个节省率随开发规模的增大而减少。20% 的开发规模下，采用蓄热/蓄冰优先运行模式下，总运行费节省率为 25.76%，其中夏季的节省率为

19.49%，冬季节省率达 40.32%；总单位电耗费用节省率为 48.91%，其中夏季的节省率为 47.74%，冬季的节省率为 49.71%。在 100% 的开发规模下，采用蓄热/蓄冰优先运行模式下，总运行费节省率为 15.66%，其中夏季的节省率为 11.73%，冬季的节省率为 24.90%；总单位电耗费用节省率为 25.7%，夏季与冬季的节省率分别为 23.87% 与 29.46%。主要原因为夏季冷负荷较大，昼间冰槽所提供的冷量占比较小，因此相对于冬季，夏季需要额外开启更多的机组用于制冷来承担负荷，在电价较高的时间段内耗电量高，再结合我国峰谷电价的政策，导致夏季总运行费用较高。通过计算得知，开发规模每增加 1%，蓄冰/蓄热优先模式下总运行费用节省率降低 0.13%，单位总电耗费用节省率减少 0.29%。

在移峰填谷指标方面，相对于机组优先运行的模式，两季中采用蓄冰/蓄热优先运行模式下移峰电量率与谷电利用率随着开发规模的增大而降低。在 20% 的开发规模下，采用蓄热/蓄冰优先运行模式下总移峰电量率高达 78.78%，其中夏季为 76.23%，冬季为 85.99%，总谷电利用率达到 86.01%，其中夏季与冬季的数值分别为 85.13%、89.45%；在 100% 的开发规模下，采用蓄热/蓄冰优先运行模式下总移峰电量率为 57.63%，其中夏季为 53.05%，冬季为 70.64%，总谷电利用率为 41.94%，其中夏季为 39.81%，冬季为 49.11%。通过计算得知，开发规模每增加 1%，蓄冰/蓄热优先运行模式总移峰电量率减少 0.27%，总谷电利用率减少 0.55%。

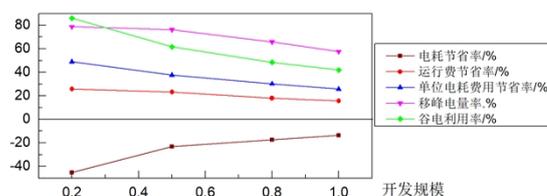


图 16 各开发规模下冬夏季参数节省率对比

Fig.16 Comparison of winter and summer parameter saving rates at different development scales

4 总结

本文研究了能源站服务片区的开发规模(20%、50%、80%、100%)对系统蓄热/蓄冰优先运行与机组优先运行两种运行模式的影响。分别确定了在各个不同工况下的运行策略，根据两季能耗的分布以及各个参数的数值，得到了开发规模这一因素对

系统运行模式的影响,由于该片区目前仍处于持续开发阶段,因此该结论在后续的开发中具有很重要的指导意义。

主要结论为在不同的开发规模下,两季系统的电耗量、运行费用、电价峰谷段的电耗量均随着开发规模的增大而增大,且二者基本呈线性关系。与机组优先运行模式相比,蓄冰/蓄热优先运行模式虽然可以减少耗电费用与运行费用,很好的起到调峰的作用,然而用电能耗却增加,因此并无节能的作用。相对于机组优先运行,每增加1%开发规模,蓄冰/蓄热优先运行模式电耗量增加率减少0.38%,运行费节省率减少0.13%,单位电耗费用节省率减少0.29%,移峰电量率减少0.27%,谷电利用率减少0.55%。

参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2017[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [2] B Rismanchi, R Saidur, H H Masjuki, et al. Energetic, economic and environmental benefits of utilizing the ice thermal storage systems for office building applications [J]. *Energy and Buildings*, 2012,50:347-354.
- [3] A Gupta, Y Anand, S K yagi, et al. Economic and thermodynamic study of different cooling options: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,62:164-194.
- [4] J S Andrepont. Combustion turbine inlet air cooling (CTIAC): benefits and technology options in district energy applications [J]. *ASHRAE Trans*, 2001,1(107): 892-899.
- [5] S N Palacio, K F Valentine, M Wong, et al. Reducing power system costs with thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2014,129:228-237.
- [6] M D Falco, M Capocelli, A Giannattasio. Performance analysis of an innovative PCM-based device for cold storage in the civil air conditioning [J]. *Energy and Buildings*, 2016,122:1-10.
- [7] M S Soler, C C Sabaté, V B Santiago, et al. Optimizing performance of a bank of chillers with thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2016,172:275-285.