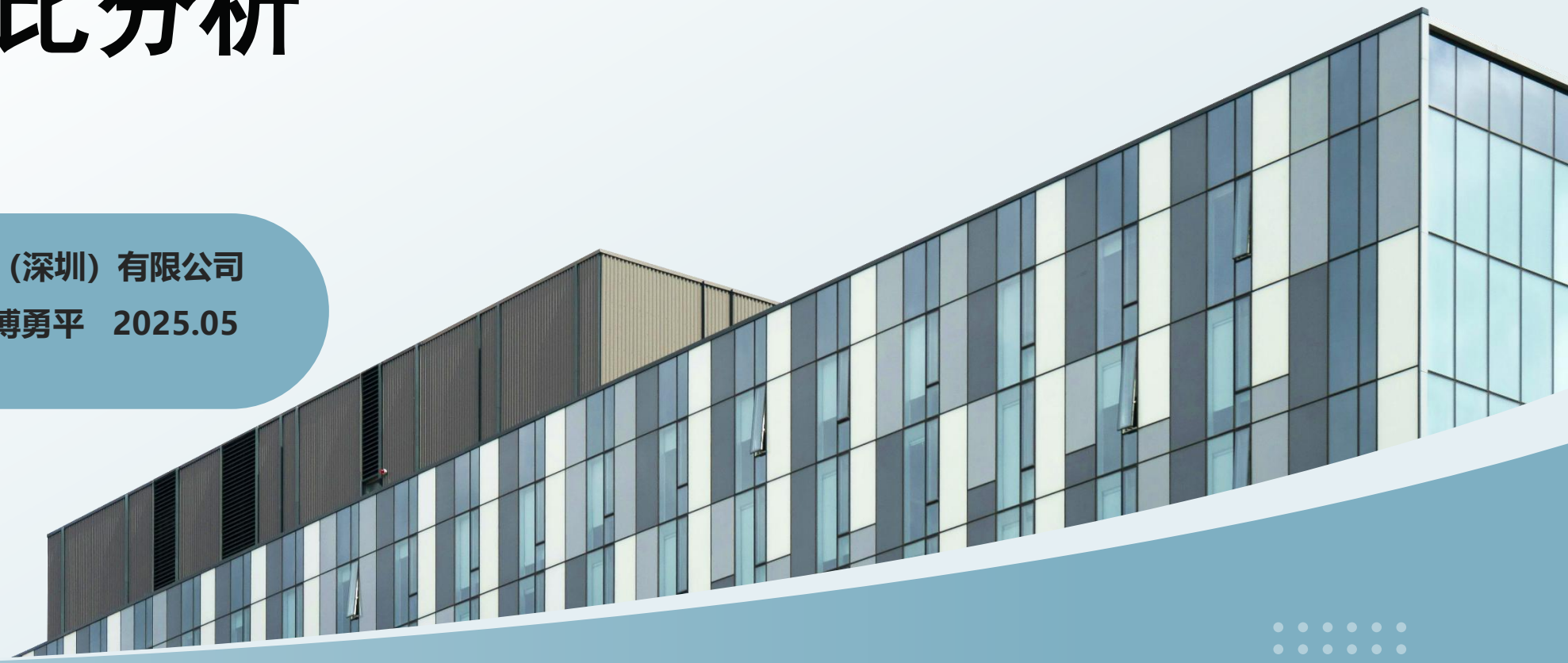
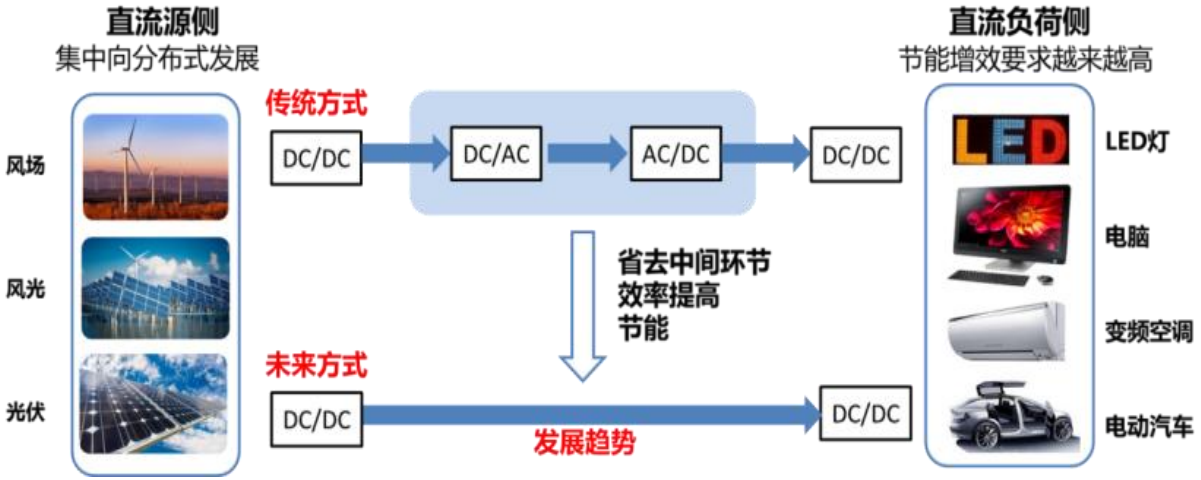
新型建筑供配电系统交直流配电能效对比分析



香港华艺设计顾问（深圳）有限公司
电气总工程师　　傅勇平　2025.05

相关观点：

分析建筑全直流供电和分布式蓄电的可行性。建筑全直流供电和分布式蓄电技术的推广，每年可以节省电力约XXXX 亿度, 为我国目前年耗电总量的2. 0 %



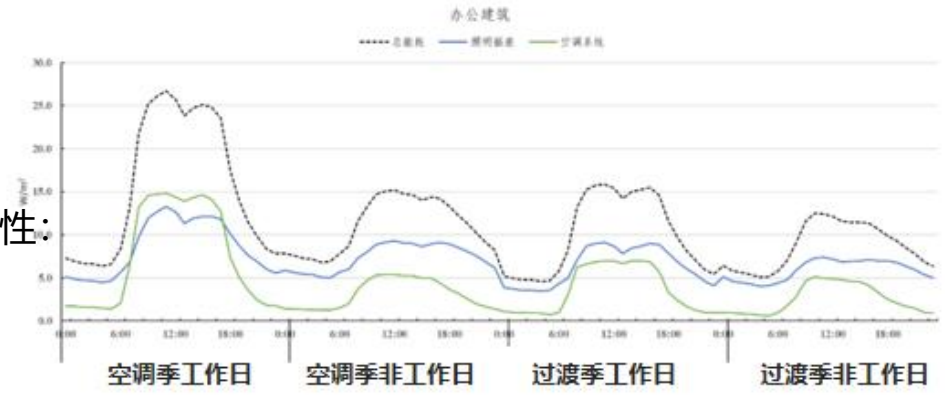
2023年深圳市人民政府印发：
《深圳市碳达峰实施方案》

◆试点建设“光储直柔”新型建筑电力系统，利用光伏、储能、电动车等构建建筑群“微电网”。到2025年，试点建设“光储直柔”项目10个以上。

民用建筑用电特点：

1 负荷的波动性：

2 光储配置的容量限值性：



❶ **光伏发电**：利用太阳能电池将太阳能直接转换为电能，属于可再生能源，环保且可持续。

❷ **储能系统**：主要指电池储能系统，可以在电力供应过剩时存储电能，在电力需求高峰时释放电能，平衡电网负荷，增强电力系统的稳定性和可靠性。

❸ **直流电力传输**：与传统的交流电传输相比，直流电传输在长距离电力传输中损耗较低，效率更高。直流电还可以直接与储能系统和用电设备相连接，减少了转换损耗。

❹ **柔性用电**：指利用先进的电力电子技术，实现对用电设备的灵活控制和调节，提高用电效率和系统的灵活性。

■ **“光储直柔”三大综合優勢**

優勢1：提高能源利用效率
優勢2：减少转换损耗
優勢3：增强系统灵活性和可靠性

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

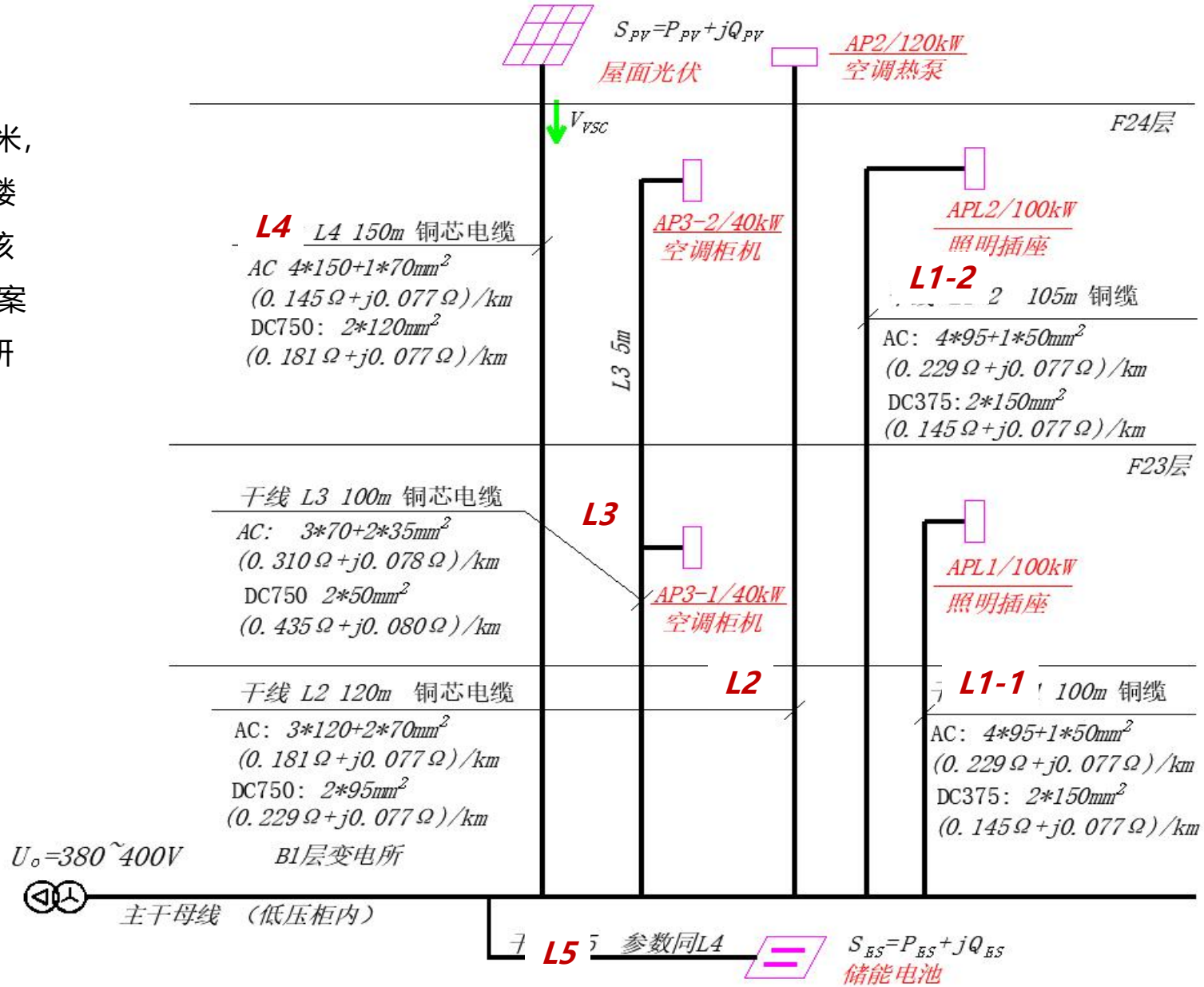
05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

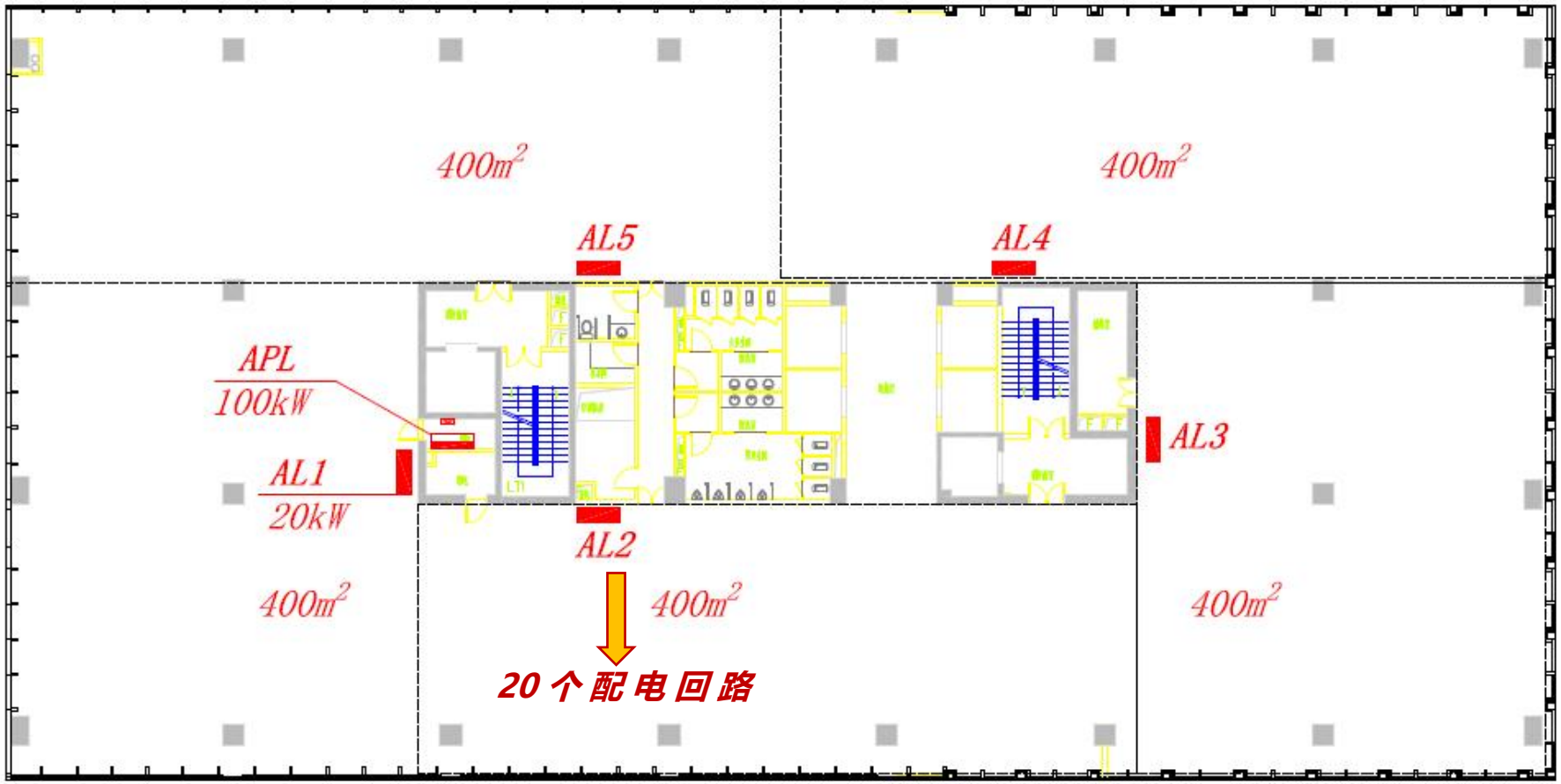
1.1 配电竖向系统图

某办公建筑总建筑面积约6万平米，顶部F23、F24两层为自用办公楼层，每层面积2500平米，其中核心筒区域400平米配电省略，本案例以除核心筒外的4000平米为研究对象。



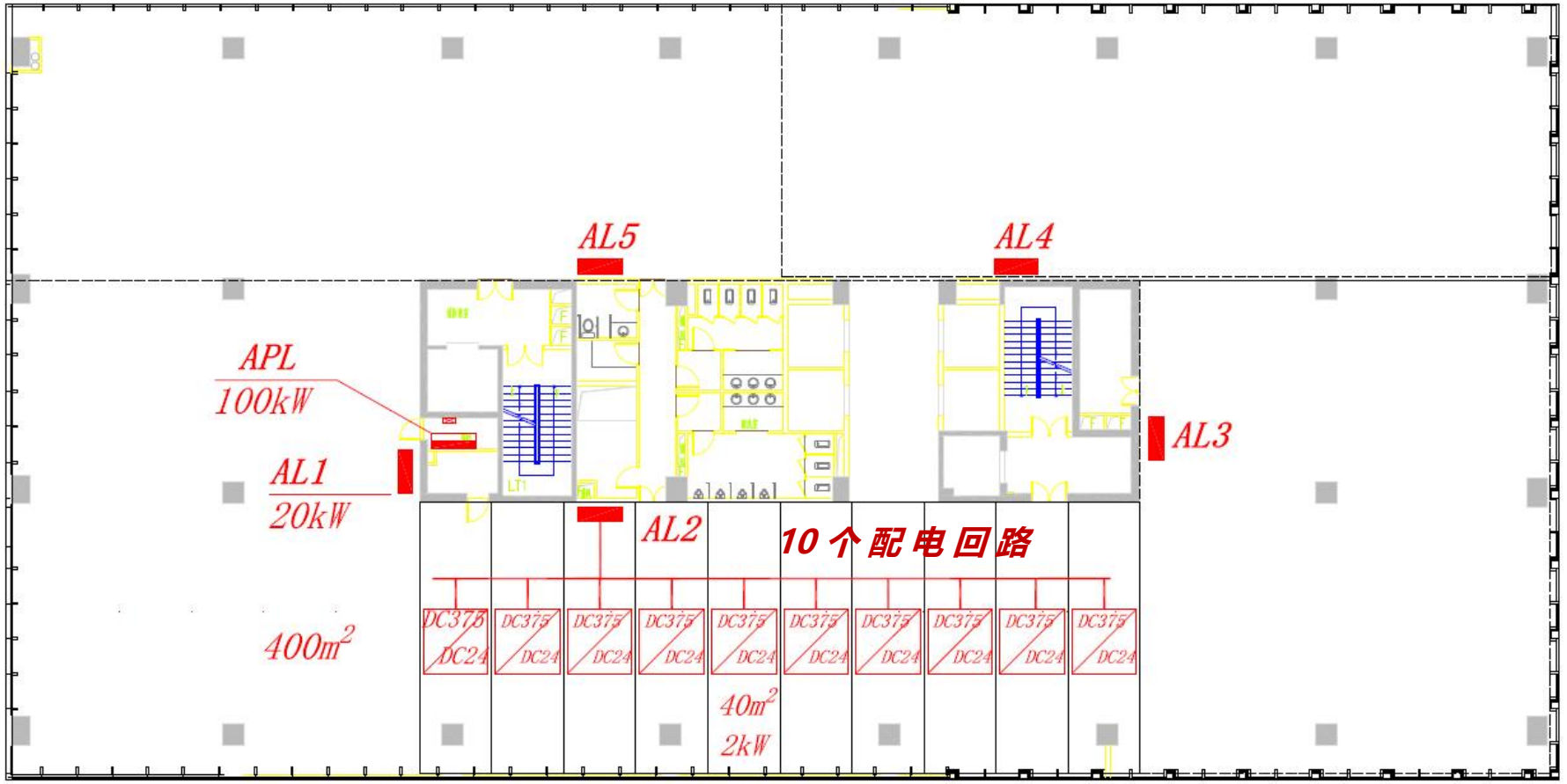
1.2 标准层平面配电箱布置---交流配电：

某办公建筑总建筑面积约6万平米，顶部F23、F24两层为自用办公楼层，每层面积2500平米，其中核心筒区域400平米配电省略，本案例以除核心筒外的4000平米为研究对象。



1.3 标准层平面配电箱布置---直流配电：

某办公建筑总建筑面积约6万平米，顶部F19、F20两层为自用办公楼层，每层面积2500平米，其中核心筒区域400平米配电省略，本案例以除核心筒外的4000平米为研究对象。



目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

2.1 能效评估公式

配电系统能效：

$$\eta = \frac{p_{load}}{p_{load} + p_{loss.C} + p_{loss.L}} \times 100\%$$

其中：

P_{load} 为负载的实际功率，

$P_{loss.C}$ 为变换器功率损耗，

$P_{loss.L}$ 为线路损耗。

其它损耗：

变压器损耗基本相同，本文不计入。

2.2 线路损耗公式

三相交流配电电缆损耗计算公式

$$\Delta P_{ac.3} = 3I_{ac.3}{}^{2}(rl)_{ac.3} = \frac{P_{ac.3}{}^{2}}{U_{ac.3}{}^{2}\cos^{2}\varphi} * (rl)_{ac.3}$$

其中：

$I_{ac.3}$ 为三相配电线路电流，

$P_{ac.3}$ 为三相负载有功功率，

$U_{ac.3}$ 为三相负载线电压。

单相交流配电电缆损耗计算公式

$$\Delta P_{ac} = I_{ac}{}^{2}(2rl)_{ac} = \frac{P_{ac}{}^{2}}{U_{ac}{}^{2}\cos^{2}\varphi} * (2rl)_{ac}$$

其中：

I_{ac} 为单相配电线路电流，

P_{ac} 为单相负载有功功率，

U_{ac} 为单相负载线电压。

直流配电电缆损耗计算公式

$$\Delta P_{dc} = I_{dc}{}^{2}(2rl)_{dc} = \frac{P_{dc}{}^{2}}{U_{dc}{}^{2}} * (2rl)_{dc}$$

其中：

I_{dc} 为直流负载电流，

P_{dc} 为直流负载有功功率，

U_{dc} 为直流负载电压。

2.3 变换器损耗

1 电能变换器设备是实现电能转换功能的电力电子装置，包含逆变器、整流器；

2 在光伏、储能并网环节中，变换器是直流侧与交流或直流电网的重要接口；

3 在负荷侧，对于直流配电系统，变换器可以实现电压适配等功能；对于交流配电系统，变换器实现交流电网与用电设备的连接。







广告 | 太阳能光伏逆变器-光伏逆变器变压...





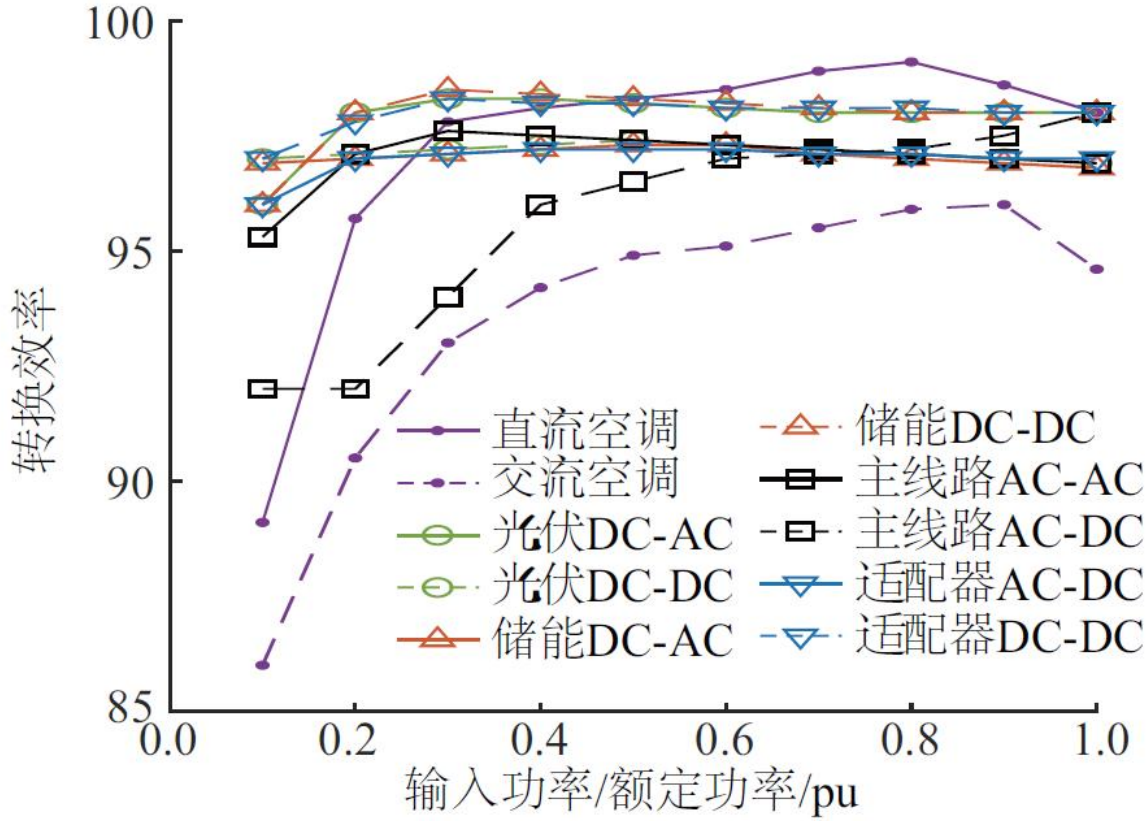


2.3 变换器损耗

1 一般换流设备的效率并非定值，与运行工况具有较大相关性，

2 变换器设备的运行效率总体呈现负载低时减少趋势，主线路AC-DC变换器效率衰减较大。末端适配器DC-DC效率变换在97.9%-97%之间，效率衰减较小，

3 且相同用途的DC-DC变换器的效率普遍高于AC-DC（DC-AC）换流器。



团标T / CPSS 1008 - 2021

《低压直流配电系统能效与电能质量综合评估方法》

图A. 5 采用的变换器能效曲线

2.3 变换器损耗

团标T / CABEE 063 - 2024

《建筑光储直柔系统变换器通用技术要求》

GCC：电网接口变换器 （grid-connected converter）

BPC：直流功率变换器 （DC power converter）

BVC：直流电压变换器 （DC voltage converter）

PVC：光伏变换器 （photovoltaic converter）

ESC：储能变换器 （energy storage converter）

1） GCC、ESC、BVC 和 BPC 的最高效率η_{max}、加权总效率η_w和轻载效率η_l应符合表 5 的要求。

表 5 GCC、ESC、BVC 和 BPC 的最高效率、加权总效率和轻载效率

变换器类型	变换器直流端口额定功率P_n	变换器能效等级					
		HE 级			GE 级		
		η_{max}	η_w	η_l	η_{max}	η_w	η_l
非隔离型	5kW≤P_n<15kW	≥97.5%	≥96.0%	≥95.5%	≥96.5%	≥95.0%	≥94.5%
	P_n≥15kW	≥98.5%	≥97.0%	≥96.5%	≥97.5%	≥96.0%	≥95.5%
单向隔离型	5kW≤P_n<15kW	≥96.0%	≥94.5%	≥94.0%	≥94.5%	≥93.0%	≥92.5%
	P_n≥15kW	≥97.0%	≥95.5%	≥95.0%	≥95.5%	≥94.0%	≥93.5%
双向隔离型	5kW≤P_n<15kW	≥95.0%	≥93.5%	≥93.0%	≥93.0%	≥91.5%	≥91.0%
	P_n≥15kW	≥96.0%	≥94.5%	≥94.0%	≥94.0%	≥92.5%	≥92.0%
注：加权总效率和轻载效率的计算方法见附录 B。							

表 6 PVC 的最高效率和加权总效率

变换器类型	额定功率P_n	η_{max}	η_a
非隔离型	5kW≤P_n<15kW	≥97.5%	≥97.0%
	P_n≥15kW	≥98.5%	≥98.0%
隔离型	5kW≤P_n<15kW	≥95.5%	≥95.0%
	P_n≥15kW	≥96.5%	≥96.0%
注：PVC 加权总效率的计算方法参考 NB/T 32004-2018 中 11.4.3.4 条公式（11）			

《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030— 2022

4.4.1 直流配电系统宜采用IT接地型式。当采用IT接地型式的直流配电系统接入城市电网时，应采用隔离型交直变换器

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

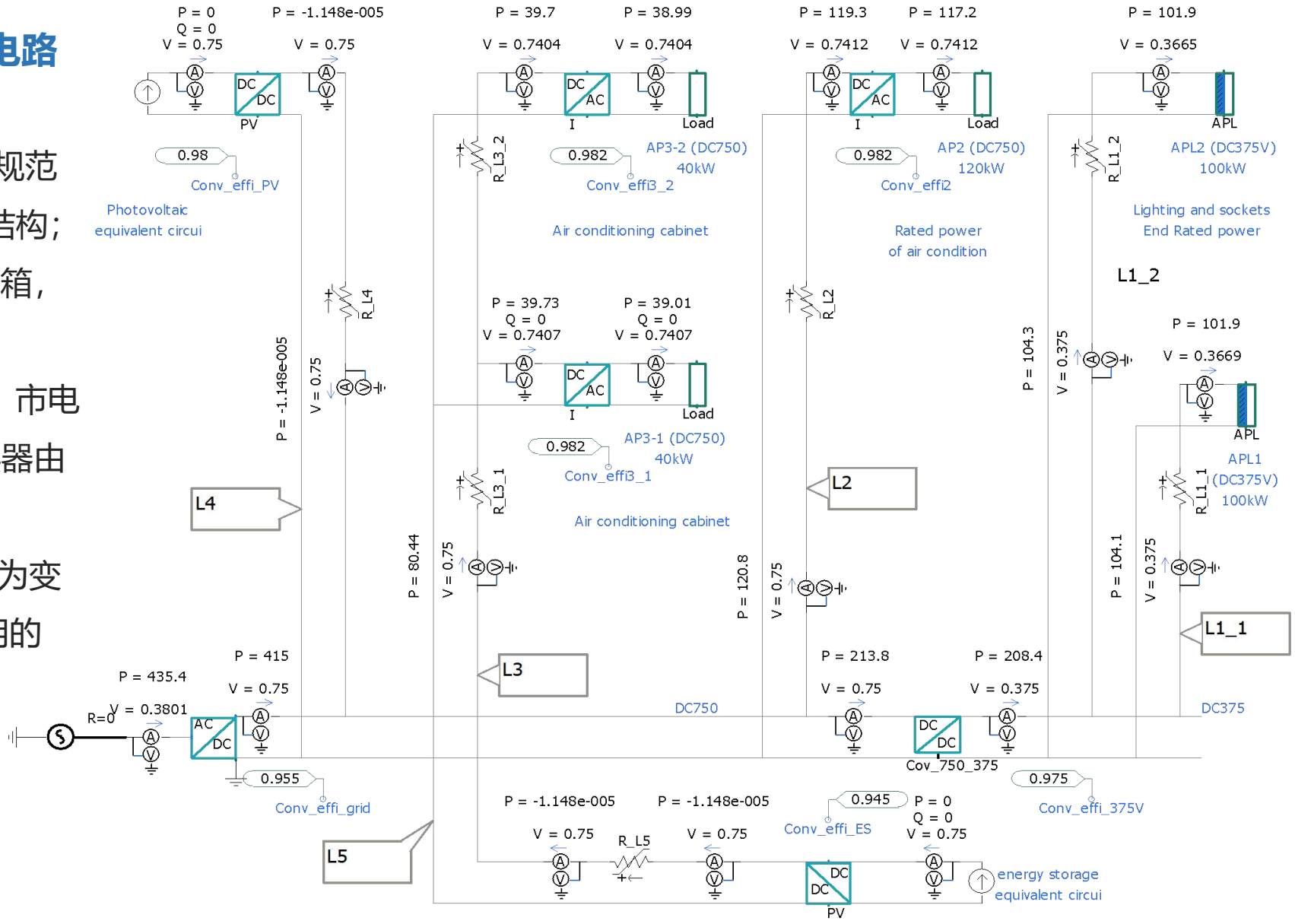
3.1.1 直流配电---竖向系统仿真电路

1 直流配电仿真电路如图3，根据相关规范要求，系统配电采用单极DC750配电结构；

2 APL1、APL2为楼层照明插座总配电箱，采用DC375V供电

3 光伏并网效率用DC-DC变换器仿真，市电变换AC380-DC750变换器，主干变换器由若干变换器并联

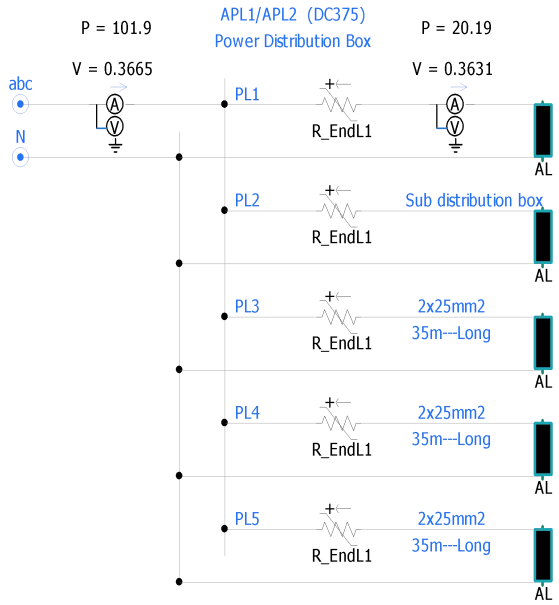
4 干线2(L2)、干线3(L3)回路负载设备为变频空调、变频电机等变频类设备，采用的DC-AC变换器



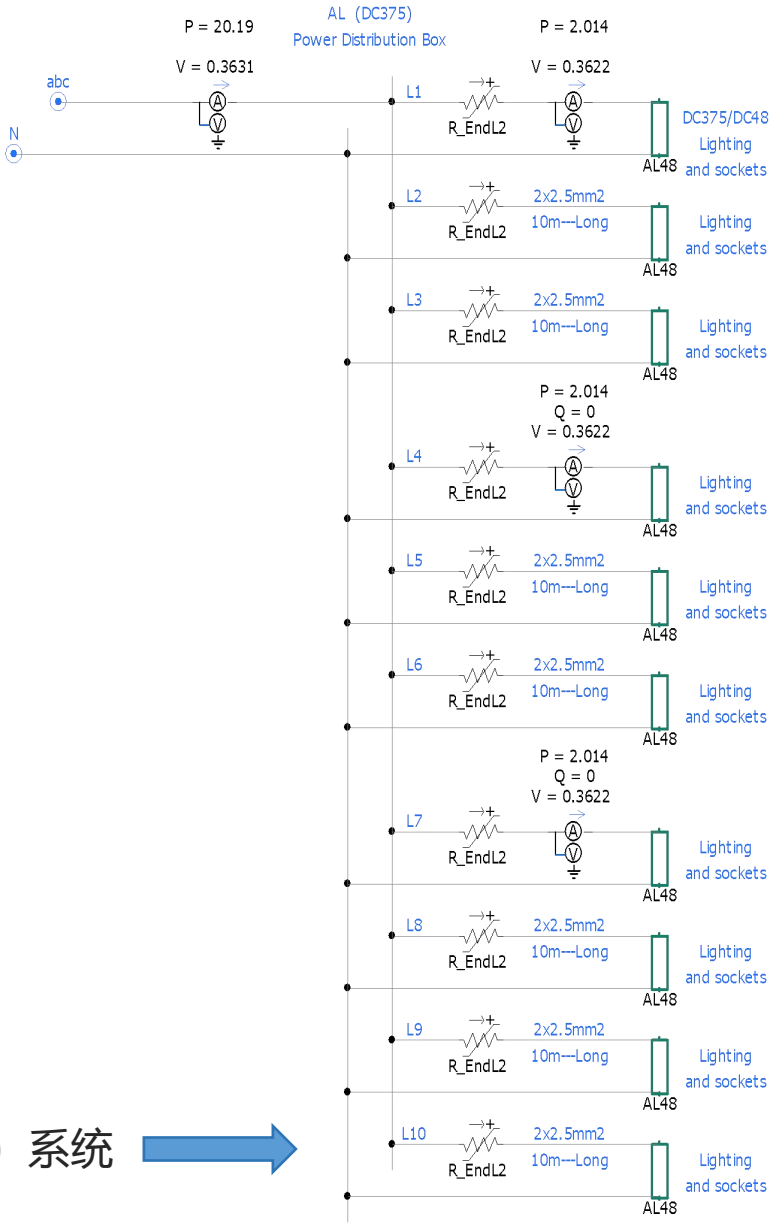
3.1.2 直流配电---楼层总/分配电箱系统

1 楼层总配电箱（APL1/2）设备功率100kW，每个楼层设5台分配电箱(AL)，设备功率20kW，

2 楼层分配电箱AL仿真电路，每台AL配电箱设有10个出线回路，AL到AL48(DC375/DC48V变换器)采用铜芯电线2*2.5mm2



楼层总配电箱（APL1/2）系统



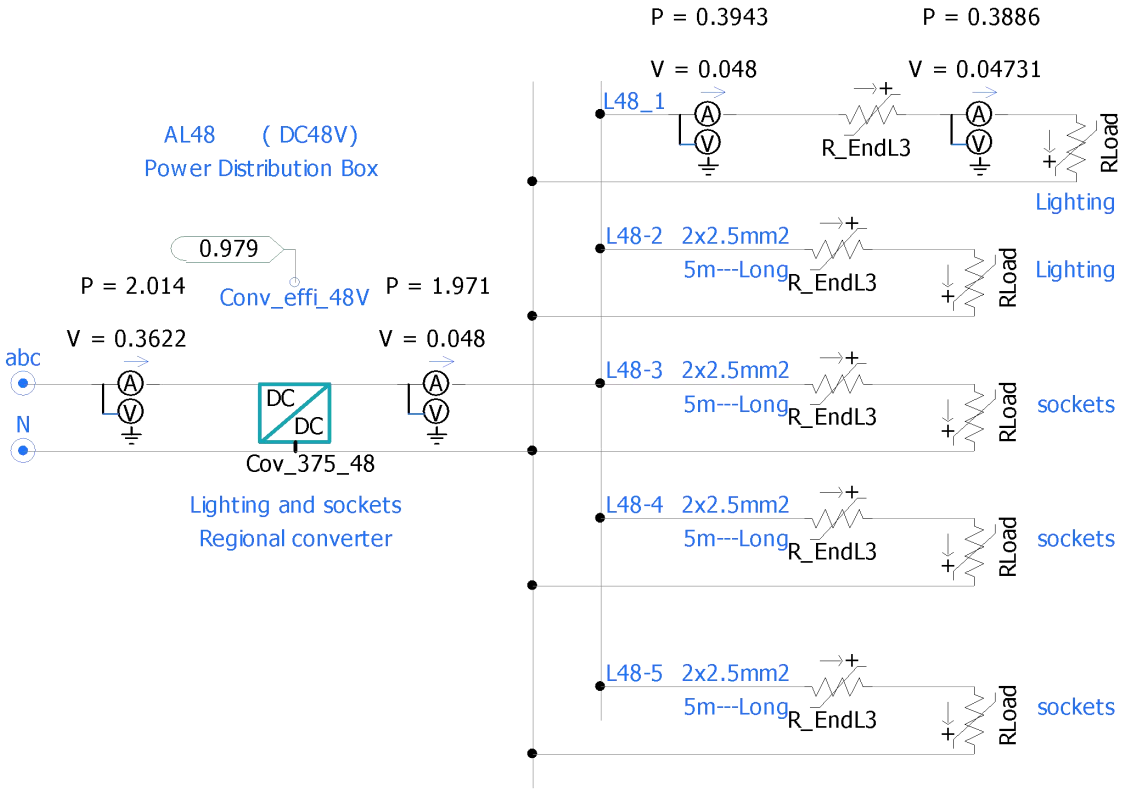
楼层分配电箱（AL）系统

3.1.3 直流配电---末端DC375/DC48变换器

1 末端变换器DC375/DC48变换器功率为2kW，变换器含PID控制，5个出线回路；

2 直接为48V的照明及插座供电；

3 DC375/DC48变换器的转换效率取0.979。



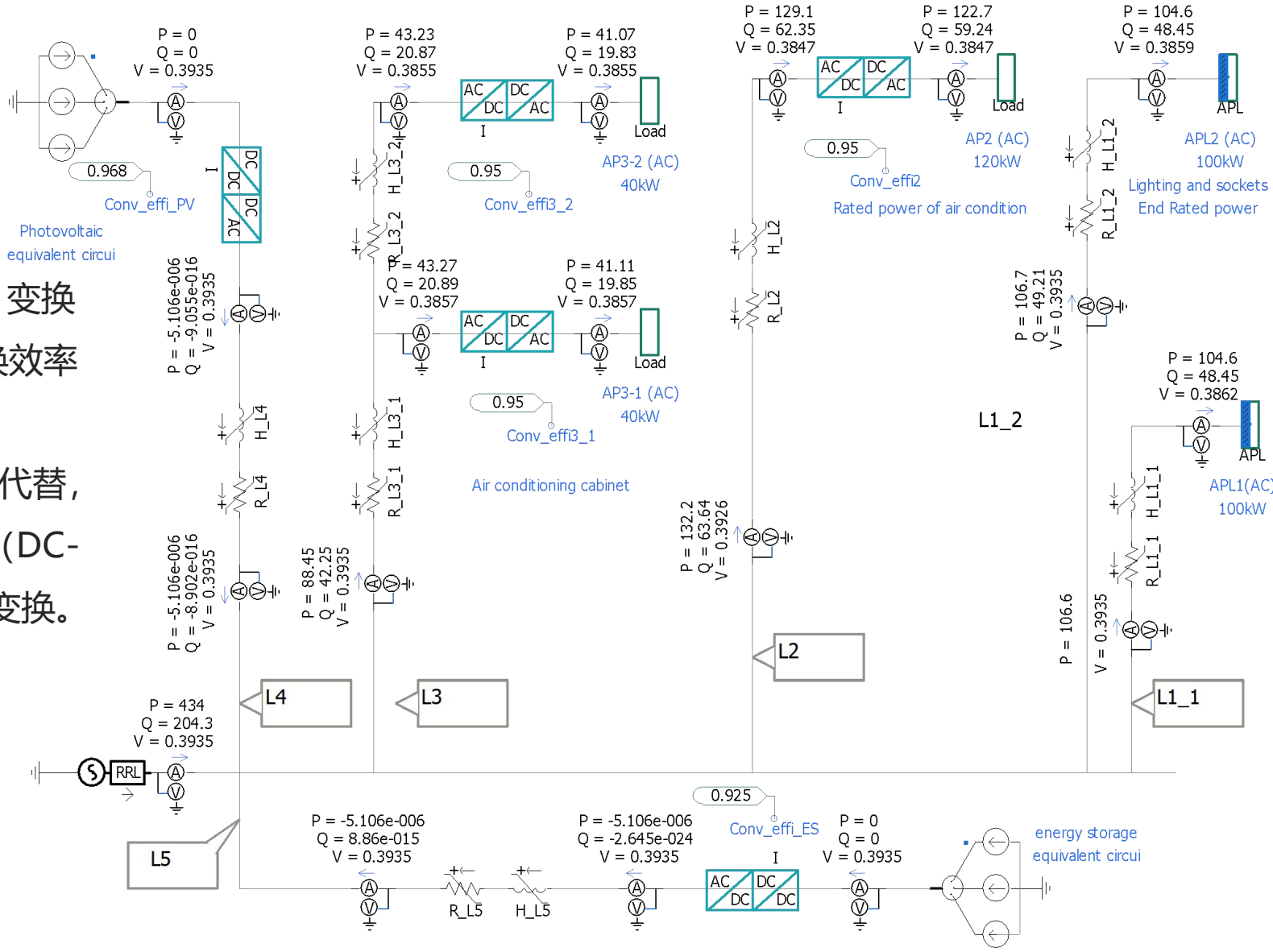
末端变换器DC375/DC48仿真电路图

3.2.1 交流配电---竖向系统仿真电路

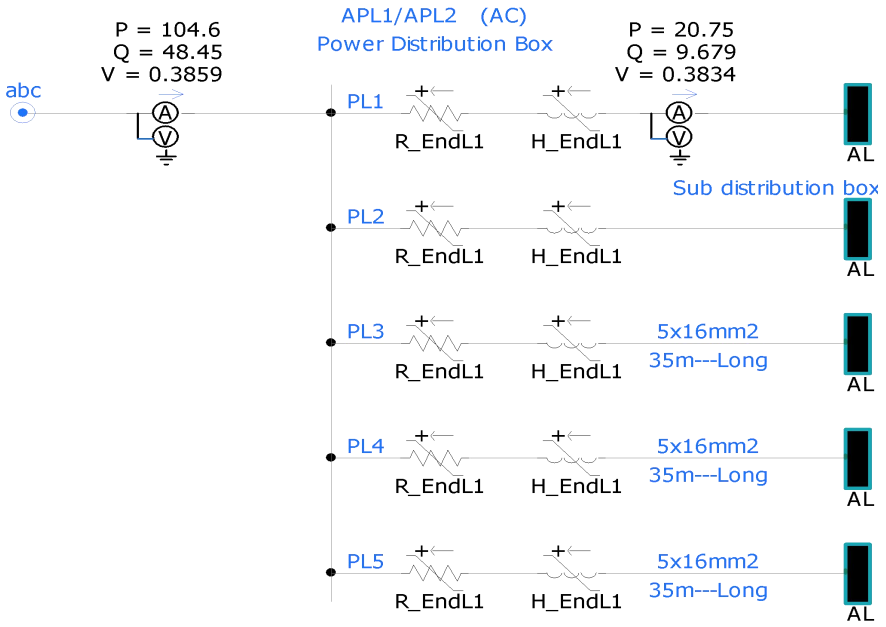
1　L2、L3采用的（AC-DC）+（DC-AC）变换器，比直流配电多了一级AC-DC变换，变换效率在1pu时为0.95；

2　光伏/储能并网电源采用三相交流电流源代替，通过干线4/5(L4/5)并网，用（DC-DC）+（DC-AC）变换器，比直流并网多了一级DC-AC变换。

3 各负载的功率因数为0.9；



3.2.2 交流配电---楼层总/分配电箱系统

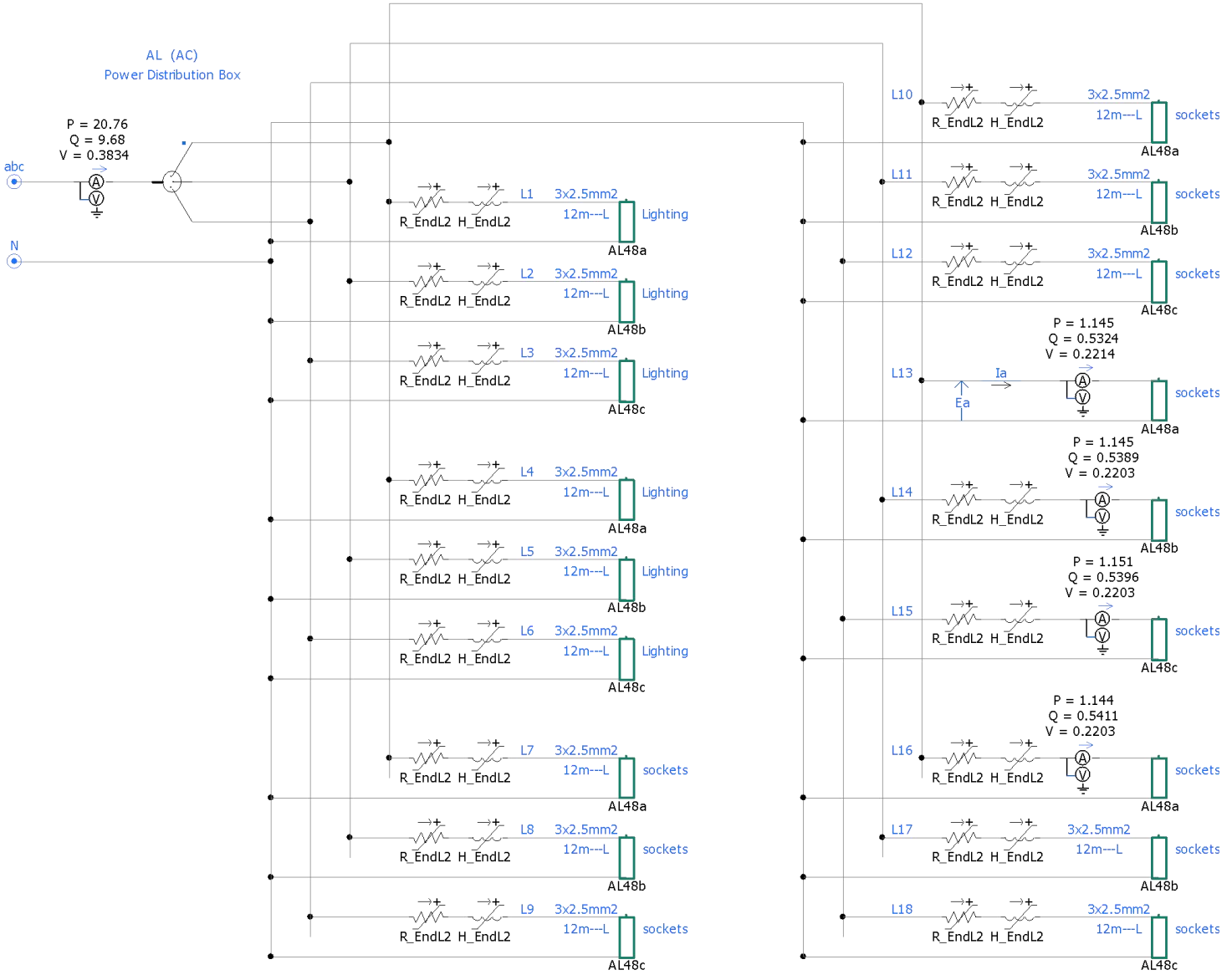


楼层总配电箱APL1/2仿真电路图

1　总配电箱APL1/2、

2 每台AL分配电箱设备功率20kW，

3 线路参数包括电感、电阻。

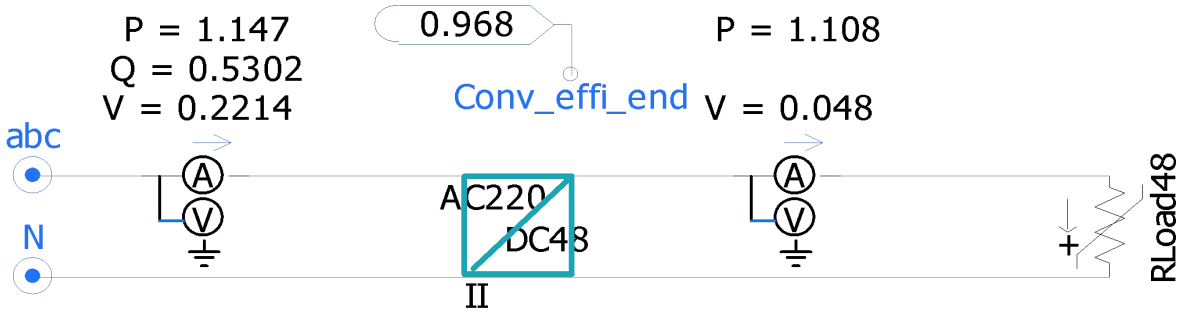


楼层分配电箱AL仿真电路图—交流配电

3.2.3 交流配电---末端设备内变换器

1 灯具或电脑等直流用电设备内部变换器AC220-DC48在设备内部，变换器含PID控制；

2 变换器每台设备仅包括开关两个状态，效率为96.8%，不计线路线路损耗。



设备内部变换器AC220-DC48仿真电路图

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

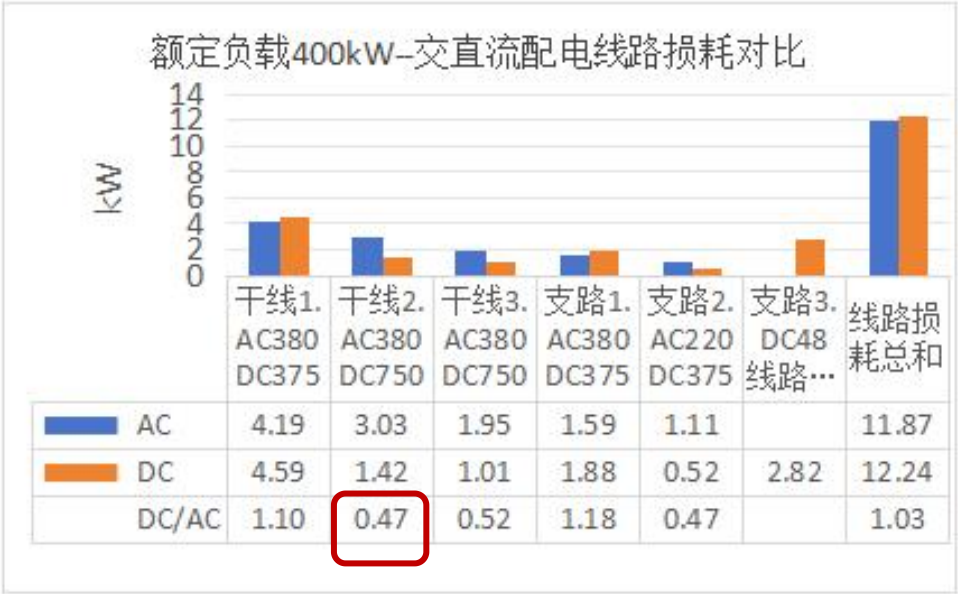
07 总结

4.1 线路损耗对比分析

1 直流配电干线1为DC375V，线路损耗大于交流AC380V损耗；

2 直流配电支路3为48V供电，线路损耗较大，而对应的交流配电线路在设备内，损耗基本为0；

3 直流配电总线路损耗与交流配电总线路损耗基本相当。



	干线1.AC380 DC375	干线2.AC380 DC750	干线3.AC380 DC750	支路1.AC380 DC375	支路2.AC220 DC375	支路3.DC48 线路…	线路损耗总和
AC	4.19	3.03	1.95	1.59	1.11		11.87
DC	4.59	1.42	1.01	1.88	0.52	2.82	12.24
DC/AC	1.10	0.47	0.52	1.18	0.47		1.03

图11 交直流配电线路损耗对比

$$\frac{\Delta P_{dc}}{\Delta P_{ac.3}} = 2(\frac{P_{dc}}{P_{ac.3}})^2(\frac{U_{ac.3}}{U_{dc}})^2\frac{r_{dc}}{r_{ac.3}}\cos^2\varphi = 2(\frac{119.3}{129.1})^2(\frac{384.7}{741.2})^2\frac{0.229}{0.181}\cos^2\varphi = 0.47$$

4 线路损耗验证：

与仿真计算直/交流线路损耗比0.47相同

4.2 变换器损耗对比分析

1 干线1交流配电末端设备变换器为(AC-DC)，干线1直流配电末端设备变换器为(DC-DC)；

2 干线2、3交流配电变换器为（AC-DC）+（DC-AC），直流配电变换器为DC-AC，直流损耗小于交流损耗；

3 主干直流配电市电-直流母线AC-DC变换器损耗25.83kW；

4 总体直流配电变换器损耗要大于交流。

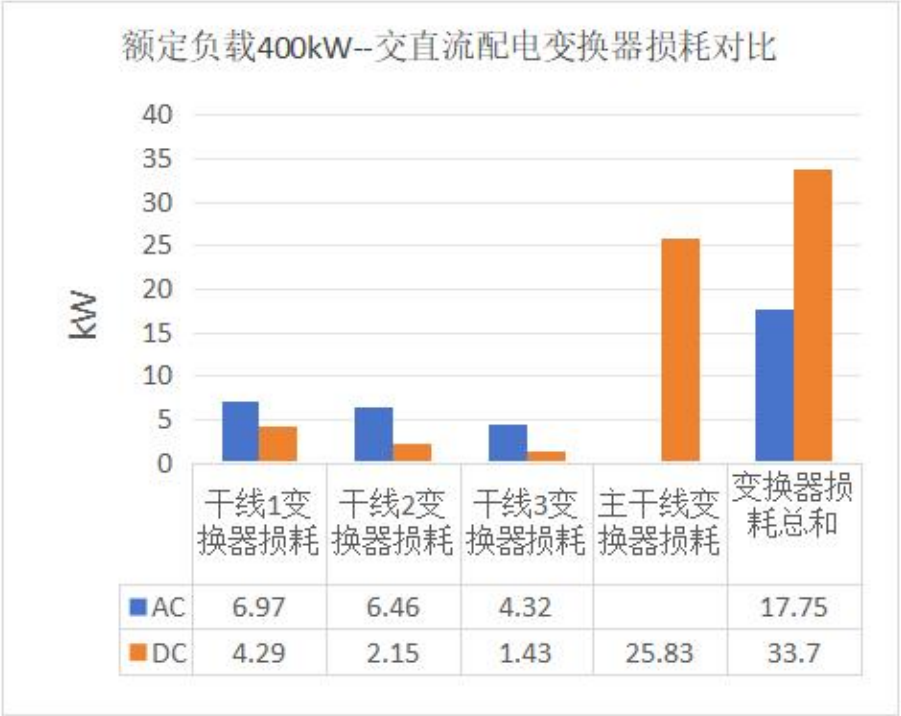


图12 交直流配电变换器损耗对比

4.3 整体配电系统传输效率对比

直流配电变换器损耗占比比交流配电高，总的传输效率比交流配电系统低3.6%。

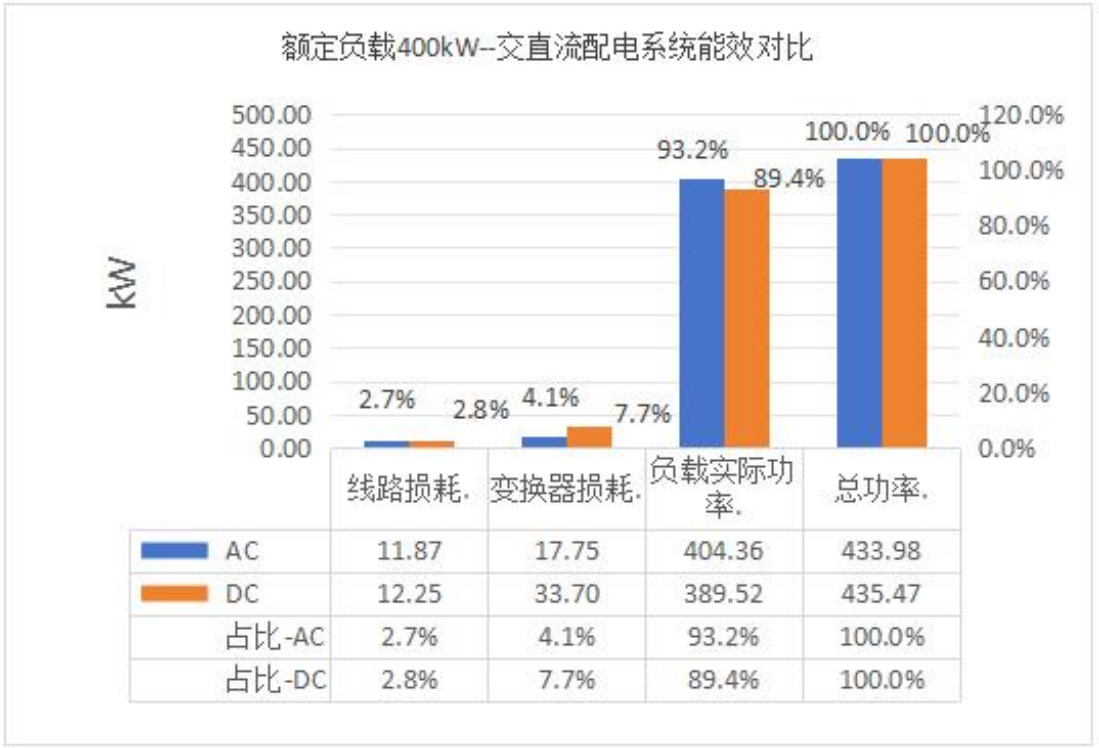


图13 交直流配电系统传输效率对比

4.4 配电系统传输效率与负载率的关系

1 民用建筑负载变化大，夜间的负载率可到5%，节假日可到10%，由于设计需考虑各种不利的情况，实际使用时变压器有很大的余量，即使在空调季节工作日，变压器负载率也通常在40%以下；

2 负载率为10%时，交直流配电系统传输效率对比；

3 负载率不同时，交直流配电系统传输效率

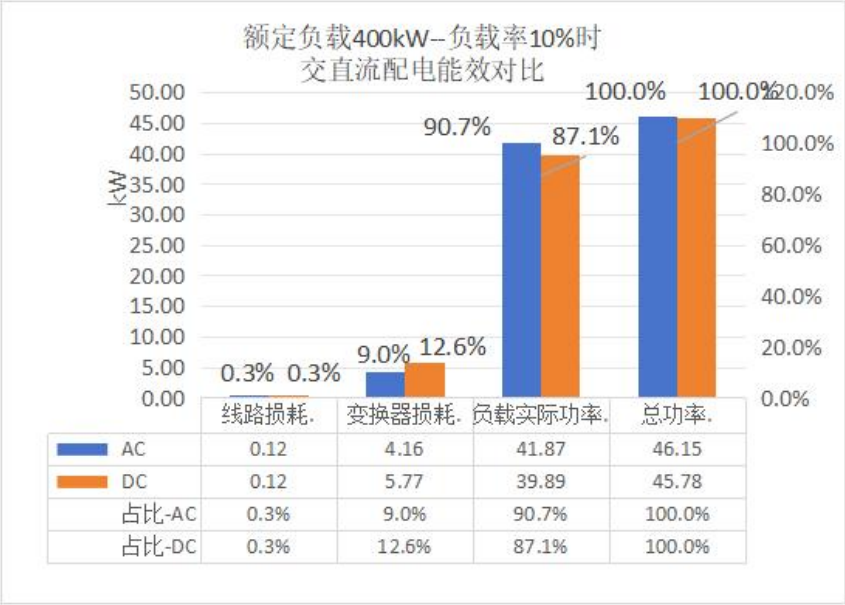


图14 负载率为10%时，交直流配电系统传输效率对比

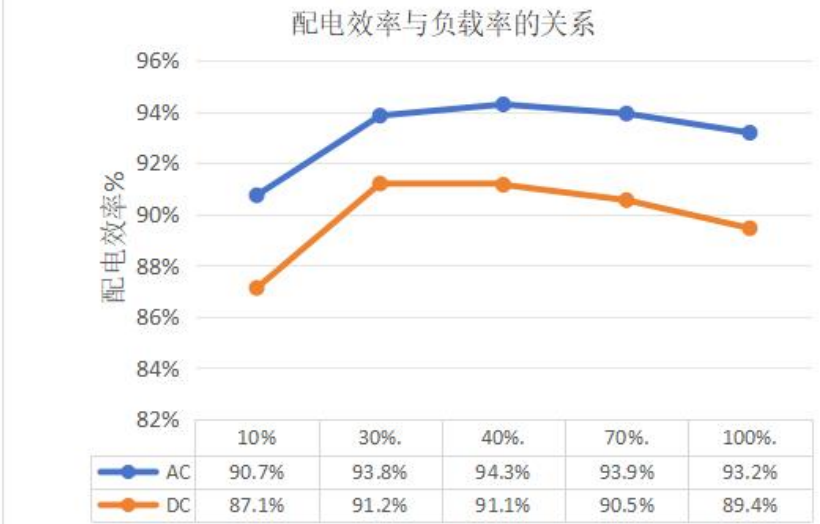


图15 负载率不同时，交直流配电系统传输效率

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

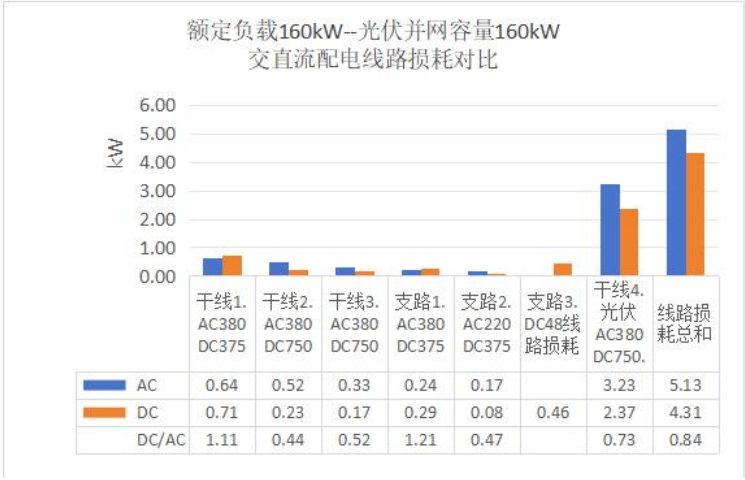
5.1 光伏/负载=100%能效对比

1 不设置储能，设变压器的高峰负载率为40%，即总功率160kW

2 同时光伏回路持续并网功率为160kW，即光伏与负载比100%，分析线路损耗、变换器损耗及配电效率；

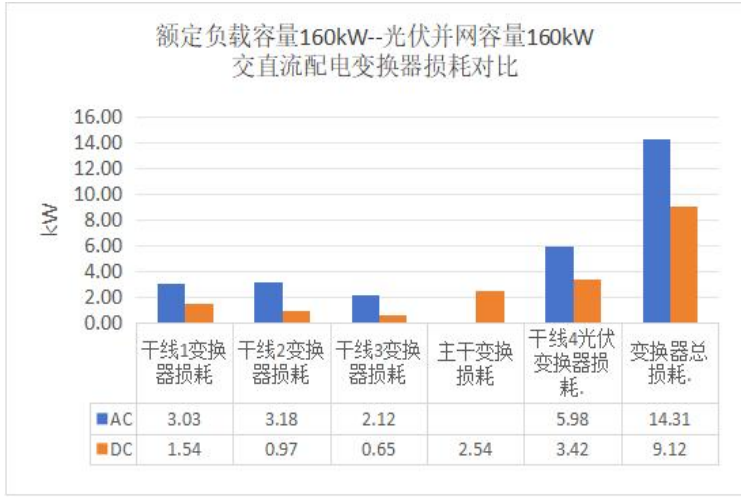
3 线路损耗直流低于交流，直流损耗小于交流，变换器总损耗直流小于交流。

4 **总的传输效率直流比交流配电系统高2.7%。**



	干线1. AC380 DC375	干线2. AC380 DC750	干线3. AC380 DC750	支路1. AC380 DC375	支路2. AC220 DC375	支路3. DC48线路损耗	干线4. 光伏 AC380 DC750.	线路损耗总和
AC	0.64	0.52	0.33	0.24	0.17		3.23	5.13
DC	0.71	0.23	0.17	0.29	0.08	0.46	2.37	4.31
DC/AC	1.11	0.44	0.52	1.21	0.47		0.73	0.84

图16 交直流配电线路损耗对比



	干线1变换器损耗	干线2变换器损耗	干线3变换器损耗	主干变换损耗	干线4光伏变换器损耗.	变换器总损耗.
AC	3.03	3.18	2.12		5.98	14.31
DC	1.54	0.97	0.65	2.54	3.42	9.12

图17 交直流配电变换器损耗对比-

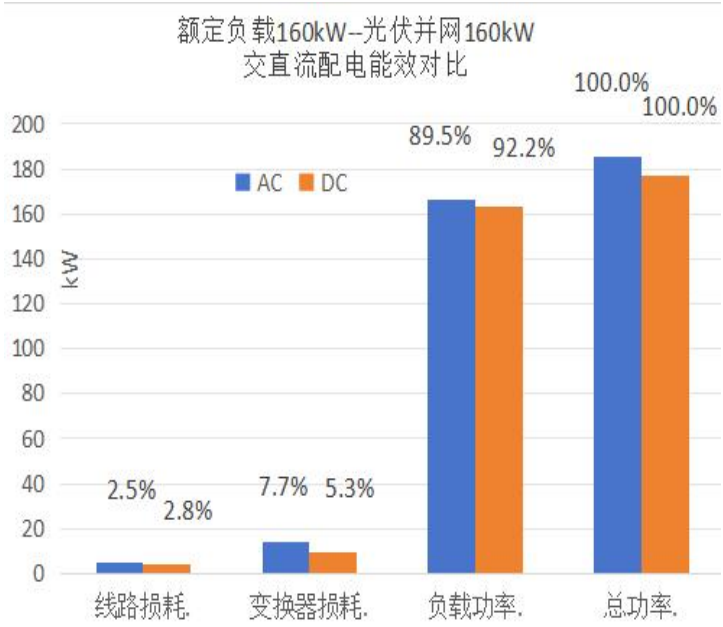


图18 交直流配电系统传输效率对比

-

5.2 光伏/负载变化时能效对比

1 直流配电的配电效率呈现升高的趋势，相应主干AC380-DC750变换器损耗的绝对值少了。

2 交流配电效率呈现降低的趋势，主要是因为光伏干线L4损耗及光伏变换器（DC-DC）+（DC-AC）损耗增加。

3 约50%时直流配电效率大于交流配电效率

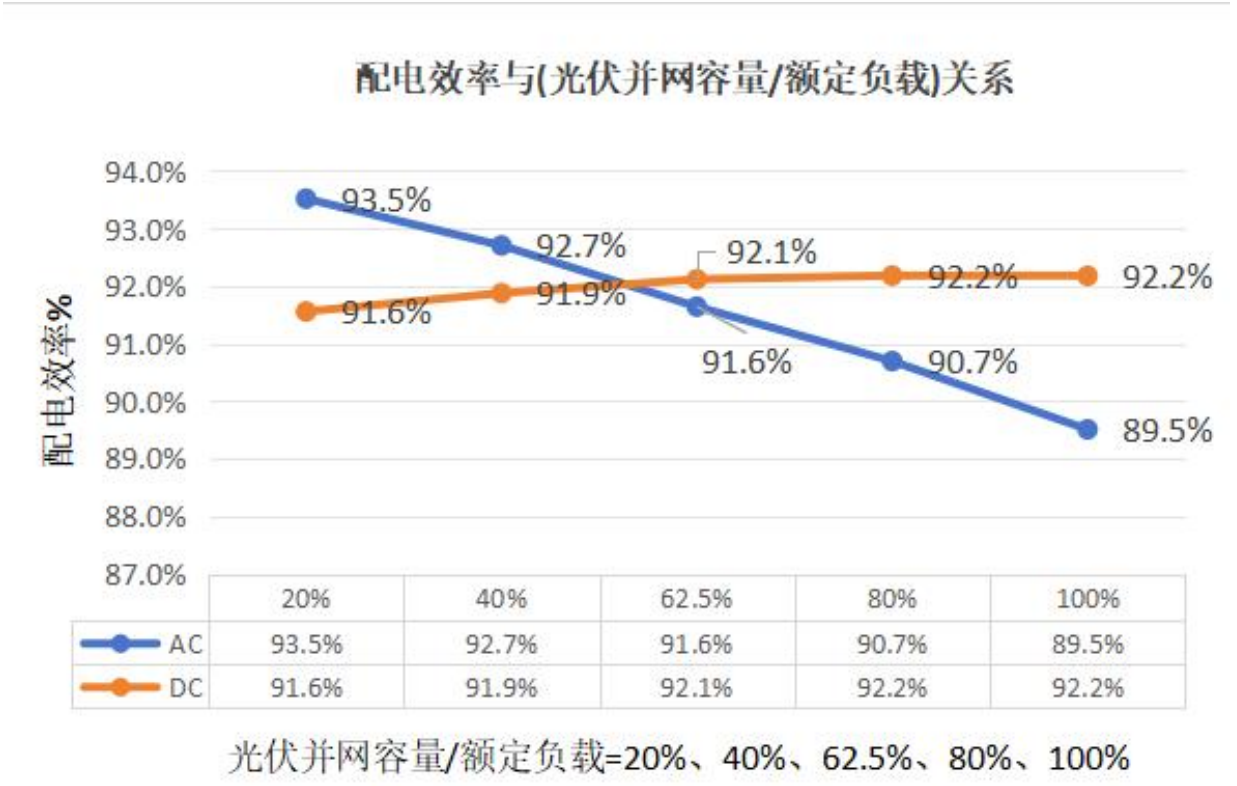


图20 配电效率与（光伏并网/额定负载）比值的折线图

5.3 储能/负载变化时能效对比

1 储能交流并网变换器效率92.5%较低，随着（储能并网容量/额定负载）比值升高，交流配电网效率衰减较大；

2 储能直流并网变换器效率94.5%小于主干AC380-DC750变换器95.5%，随着储能比例提高，直流配电网效率呈下降趋势。

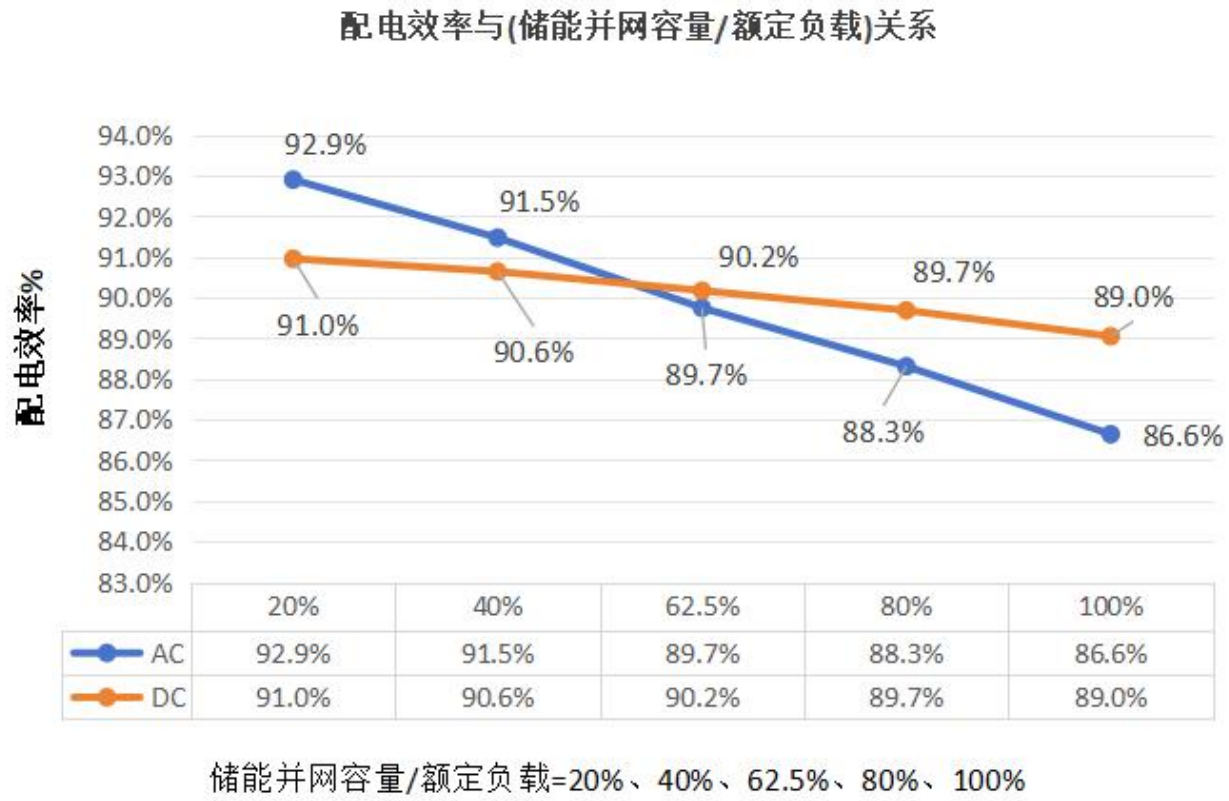


图21 配电效率与（储能并网/额定负载）比值的折线图

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

6.1典型日负荷强度曲线

深圳一年可划分为**夏季（空调季）、冬季和春秋过渡季**（非空调季），分布月份分别为5—10月、12—2月和3、4、11月，则3种季节典型日的**天数分别为184，90和91天**[13]。根据用电功率大小，可统计出全年的夜间、空调季工作日、其它时间（包括空调季非工作日、非空调季节白天）三个场景的小时数

包括空调系统强度、照明插座强度及总强度曲线，在强度场景中分为空调季工作日（功率密度PD=28W/m2）、空调季非工作日（PD=14W/m2）、非空调季工作日（PD=14W/m2）、非空调季非工作日（PD=12W/m2）。为了简化计算，用直线段把总负荷（虚线）拟合，使两曲线与时间轴的面积相等。

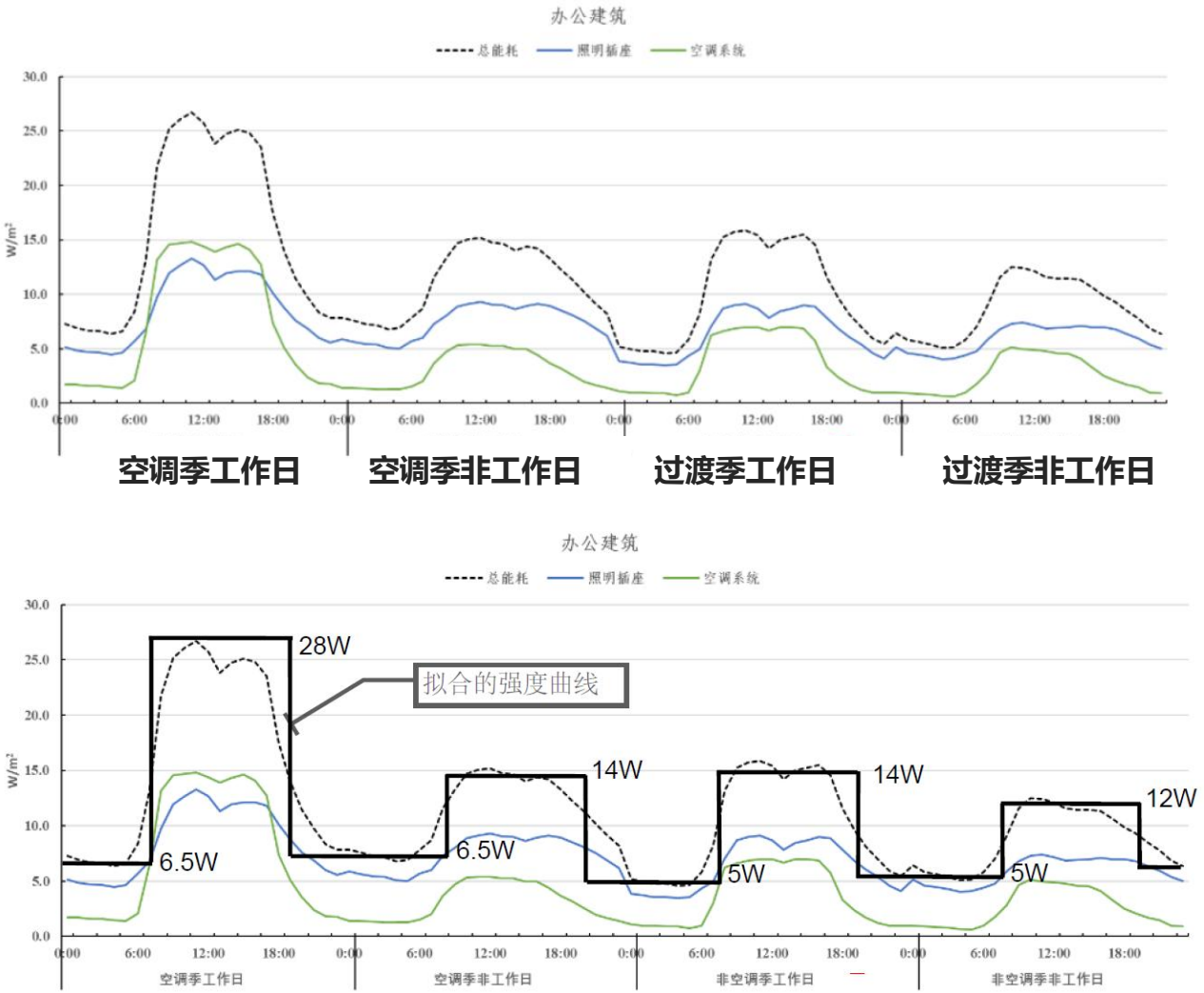


图22 深圳市办公建筑典型日能耗强度特性曲线

6.2无光储配置时，全年交直流配电能效对比

1 空调日DC配电效率91.2%，低于AC配电效率93.8%。

2 夜间DC配电效率89.3%，低于交流效率96.2%;

3 在场景中的其它时间（包括空调季非工作日、非空调季工作及假日）DC配电效率91.6%，低于AC配电效率94.2%;

4 全年直流配电效率90.9%，低于交流配电94.5%。

5 按交流配电总电能计算，本案例单位面积全年**能耗为112.6kWh/㎡.a**，考虑到建筑核心筒及地下室等因素，与深圳市办公建筑**用电指标限值96kWh/㎡.a**基本相当[8]。



图23 交流配电全年不同场景配电效率

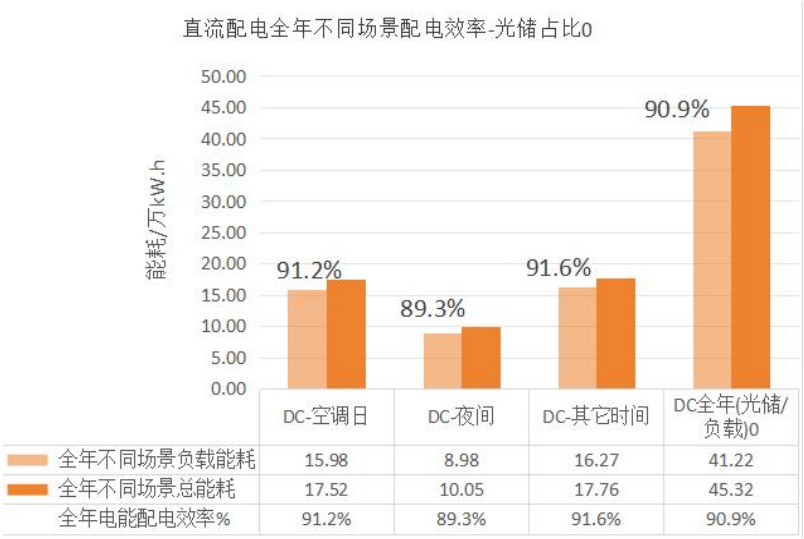


图24 直流配电全年不同场景配电效率

6.3.1 光储容量满足空调季工作日50%配置，全年交直流配电能效对比

1 光储50%配置需求量为
4000m2*28W/m2*50%*11h=616kWh；

2 光伏配置：安装光伏板的面积500平米，光伏装机容量约80kW。光伏发电量=80kW*3.76h=300kWh
图27，其中夏季光伏峰值最大，最大值可达52kW。

3 **储能电池配置：616kWh-80kW*3.76h≈315kWh**
设放电效率0.9，则电池的安装容量约350kWh

4 **光储100%配置，储能电池配置：(1232kWh-80kW*3.76h)/0.9≈1035kWh**

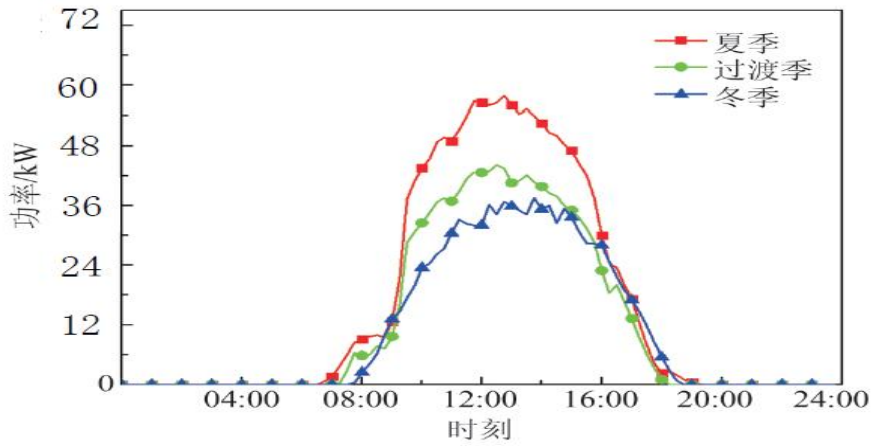


图27深圳市某80kW光伏电站典型日出力特性曲线

6.3.2 光储容量满足空调季工作日50%配置，全年交直流配电能效对比

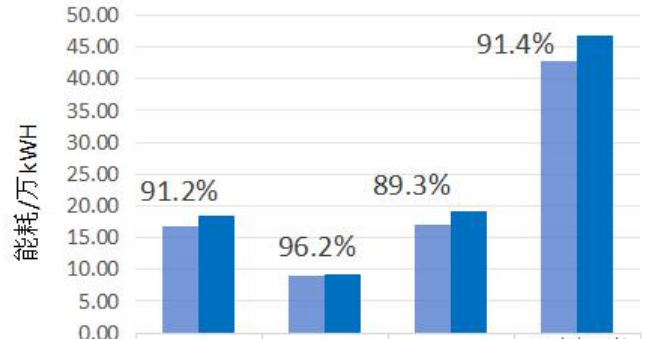
1 空调日DC配电效率91.3%，AC配电效率91.2%，基本相同。

2 夜间直流配电效率89.3%，低于交流效率96.2%；

3 在场景中的其它时间（包括空调季非工作日、非空调季工作及假日）DC配电效率93.5%，高于AC配电效率90.7%；

4 **全年直流配电效率91%，交流91.4%，基本相当。**

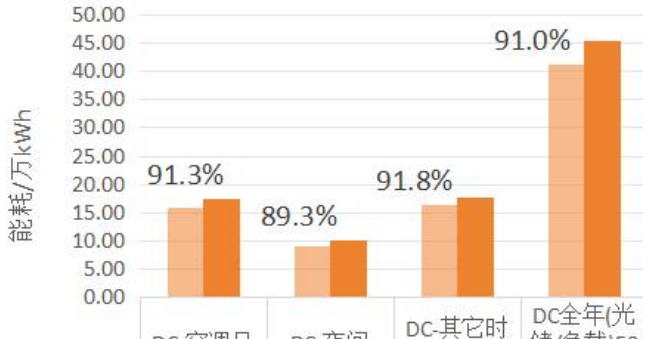
交流配电全年不同场景配电效率-光储占比约50%时



	AC-空调日	AC-夜间	AC-其它时间	AC全年(光储/负载)50%
全年不同场景负载能耗	16.76	8.98	17.11	42.84
全年不同场景总能耗	18.37	9.33	19.16	46.87
全年电能配电效率%	91.2%	96.2%	89.3%	91.4%

图25 交流流配电全年不同场景配电效率

直流配电全年不同场景配电效率-光储占比约50%时



	DC-空调日	DC-夜间	DC-其它时间	DC全年(光储/负载)50%
全年不同场景负载能耗	15.98	8.98	16.27	41.22
全年不同场景总能耗	17.51	10.05	17.72	45.28
全年电能配电效率%	91.3%	89.3%	91.8%	91.0%

图26 直流配电全年不同场景配电效率

6.3.3光储容量满足空调季工作日100%配置，全年交直流配电能效对比

1 空调日DC配电效率90.0%，高于AC配电效率87.4%；

2 夜间DC配电效率89.3%，低于AC效率96.2%；

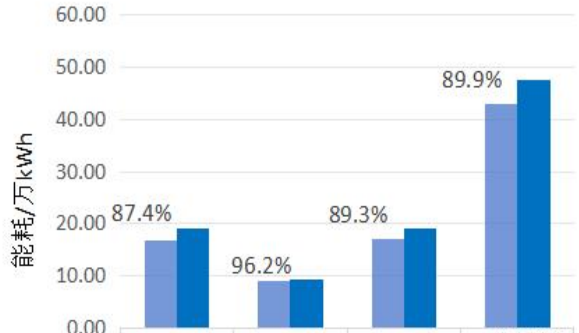
3 在场景中的其它时间（包括空调季非工作日、非空调季工作及假日）DC配电效率91.8%，高于AC配电效率89.3%；

4 全年的DC配电效率90.6%，略高于AC配电效率89.9%。

5 **光储100%配置，储能电池配置**：(1232kWh-80kW*3.76h)/0.9≈1035kWh,

在过渡季，储能电池无法充分利用，不经济

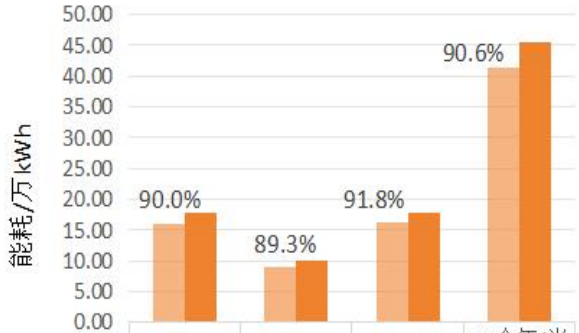
交流配电全年不同场景配电效率-光储占比100%



	AC-空调日	AC-夜间	AC-其它时间	AC全年(光储/负载)100%
全年不同场景负载能耗	16.76	8.98	17.11	42.84
全年不同场景总能耗	19.17	9.33	19.16	47.67
全年电能配电效率%	87.4%	96.2%	89.3%	89.9%

图28 交流配电全年不同场景配电效率

直流配电全年不同场景配电效率-光储占比100%



	DC-空调日	DC-夜间	DC-其它时间	DC全年(光储/负载)100%
全年不同场景负载能耗	15.98	8.98	16.27	41.22
全年不同场景总能耗	17.75	10.05	17.72	45.52
全年电能配电效率%	90.0%	89.3%	91.8%	90.6%

图29 直流配电全年不同场景配电效率

6.4 光储/负载占比变化，全年交直流配电能效对比

1 电能配电效率

当光储容量小于50%时，储能占比小，直流配电效率平稳，当大于50%时，储能占比提高，直流配电效率下降趋势。

2 电费配电效率

当光储容量大于40%时，电费配电效率直流大于交流，当光储/负载容量为100%，电费配电效率直流大于交流约1.6%，

深圳市分时电价

	峰	平	谷
电价（元/kWh）	1.1767	0.7749	0.2683
用电时段	10.00--12.00 14.00--19.00	8.00--10.00 /12.00--2.00 19.00--24.00	0.00--8.00

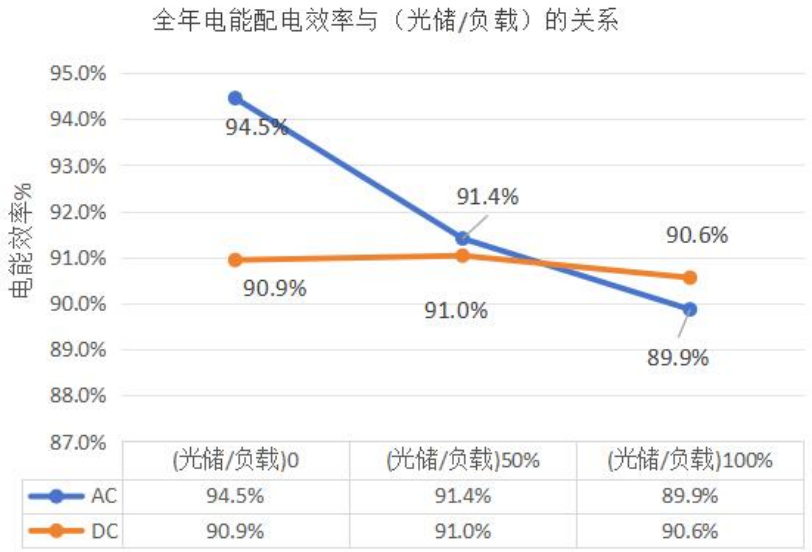


图30 全年电能配电效率与（光储/负载）比值关系

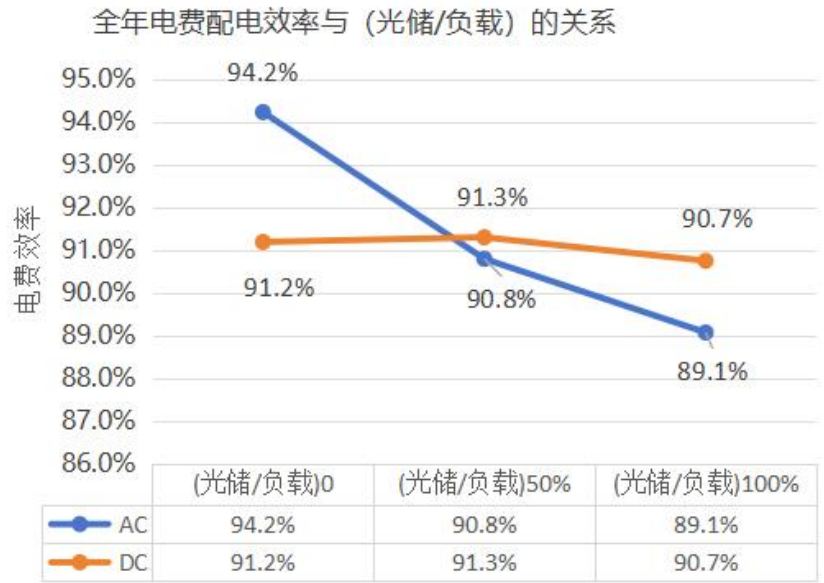


图31 全年电费配电效率与（光储/负载）比值关系

6.5 光储/负载占比变化，

全年交直流配电能效对比---干线AC-DC采用GE变换器

3. HE级与GE级的主要区别

特性	HE级变换器	GE级变换器
能效等级	高效率（IE4或更高）	普通效率（IE2或IE3）
效率范围	95%以上	90%-94%
技术复杂度	高（采用先进器件和技术）	较低（技术成熟）
成本	较高	较低
应用场景	高端工业、新能源领域	普通工业、家用电器
节能效果	长期运行节能显著	节能效果一般

1 电能全年配电效率直流总低于交流，电费全年配电效率当光储/负载容量要大于约75%，才有优势。

2 直流配电效率与电网直流母线变换器转换效率（AC-DC）有很大的相关性

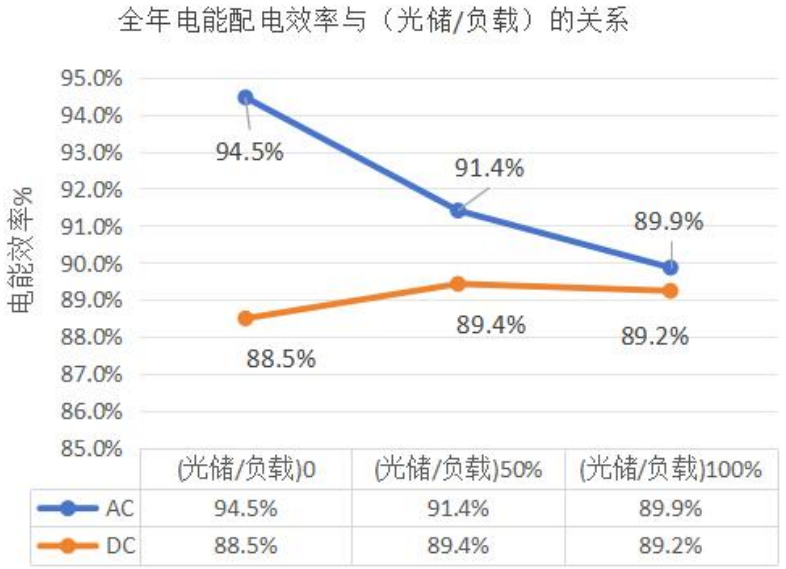


图32 全年电能配电效率与（光储/负载）比值关系---（干线为GE变换器）

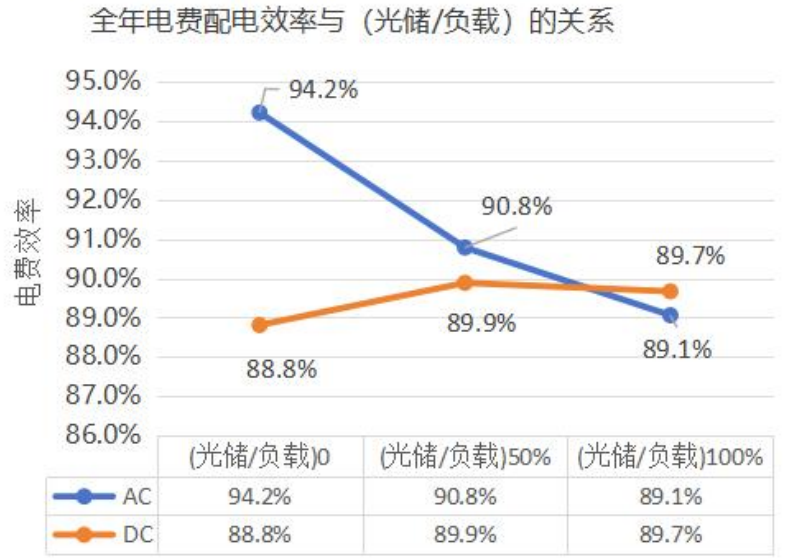


图33 全年电费配电效率与（光储/负载）比值关系---（干线为GE变换器）

目录

01 案例介绍

02 配电系统能效评估方法

03 交直流配电仿真模型建立（PSCAD）

04 无光储并网条件下配电系统传输能效对比

05 光伏储能并网条件下配电系统传输能效对比

06 全年运行传输能效对比

07 总结

无光储并网

在没有光储并网，直流配电的传输效率低于交流配电

光储并网容量增加

随着光储并网容量与额定负载比值的升高，直流配电的配电效率呈现上升趋势。



全年配电效率分析

电能全年配电效率，本案例中当（光储容量/负载）约大于60%时，直流配电效率大于交流配电效率

电费全年配电效率，本案例中当（光储容量/负载）约大于40%时，直流配电效率大于交流配电效率

民用建筑配电选择参考

配电效率与电网-直流母线变换器（AC-DC）、储能变换器效率有很大的相关性。

谢谢

THANK YOU

