# 基于自主式元胞电网模式的电源及耦合点规划方法

赵鹏臻<sup>1</sup>,徐 谦<sup>2</sup>,谢 宁<sup>1</sup>,王承民<sup>1</sup>,王 蕾<sup>2</sup>,邹 波<sup>2</sup> (1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240; 2. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院,浙江 杭州 310008)

摘要:针对传统电网模式的局限性,提出自主式元胞电网(AWoC),并对其模式和基本规划方法进行介绍。对 电源及耦合点规划进行数学建模并建立规划方案的评估方法。结合某地区实际负荷情况进行算例仿真,结 果表明AWoC中的多元胞划分在可靠性和经济性上具有优势,且AWoC为高渗透率可再生能源发电和储能 接入电网提供了新的有效尝试。

DOI:10.16081/j.epae.202106019

### 0 引言

配电网是电力系统中连接输电和用电的关键环 节,同时也是用户可直接接触到的电力系统组成部 分<sup>[1]</sup>。配电网的规划设计合理与否,与电力系统的 经济性和可靠性密切相关。随着一系列新理念新技 术的出现,传统的电网规划方式逐渐不能适应电力 系统的变化。智能电网综合研究计划(ELECTRA)以 E-highway2050所做的情景研究为基础,提炼出未来 电力系统的7项发展趋势:发电单元将从传统的可 调度单元向间歇式可再生能源过渡;发电单元将从 中央输电系统向分散的配电系统大幅过渡;发电将 从几台大型发电机组向大量小型发电单元过渡;用 电量显著增加;电能储存技术会为系统辅助服务提 供高性价比的解决方案;分布广泛的传感器将极大 提高电力系统的可观测性;大量快速响应的分布式 能源能够提供电力储备能力<sup>[23]</sup>。

在此背景下,传统的电网模式及规划方法逐渐 不再适用。21世纪以来,我国开始进入第三代电力 系统的发展阶段,伴随着负荷增长和化石能源等不 可再生资源的大量消耗,可再生能源发电量占比将 逐步提高,预计到2050年可达67%左右,成为电力 系统的第一主力电源<sup>[4]</sup>。可再生能源发电,尤其是 风电、光电等,具有很强的不确定性和波动性,会引 起电网消纳和弃风、弃光问题,这也是限制可再生能 源发电渗透率提高的主要原因。

针对分布式电源大量接入后发电厂功能降低的问题,有学者提出将负荷和分布式电源综合管理以 替代传统发电厂功能与服务的虚拟电厂VPP(Virtual Power Plant)的概念<sup>[5]</sup>。为解决随着用电量激增而导

收稿日期:2020-07-23;修回日期:2021-04-29

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY19000X) Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211JY19000X) 致的输电功率增加的问题,在2002年电气可靠性技 术解决方案联合会(CERTS)上将根据成员客户利益 划分的电源和终端接收机组成半自治分组,即微电 网的概念<sup>[6]</sup>被提出,用以降低输电功率。在2008年 国际大电网会议(CIGRE)上具有主动控制和运行能 力的主动配电网 ADN(Active Distributed Network) 的概念被提出,其能利用先进的自动化、通信和电力 电子等新技术实现对接入配电网的分布式电源和其 他设备的主动管理 AM(Active Management)<sup>[7,8]</sup>。 ELECTRA 在 2015年国际供电会议(CIRED)上提出 由许多通过内部可调节电源、负荷或者储能实现按 照协议稳定进行边界功率交换的微系统组成的元胞 电网 WoC(Web-of-Cell)体系的概念<sup>[9]</sup>。

各国都针对以上电网模式进行研究并建立示范 工程,取得了一定的进展,同时也发现这些电网模式 的局限性,并针对这些局限性进行了各种尝试<sup>[10-13]</sup>。 针对这些局限性,本文提出自主式元胞电网AWoC (Automous Web-of-Cell)的全新电网模式。相比于 主动配电网,其自下而上的设计理念具有更强的灵 活性和可拓展性;相比于微电网,集群概念的引入很 好地解决了和主网的协同规划与运行问题,也进一 步提升了其可靠性;相比于传统WoC,聚、散耦合点 的设计使得储能可以更好地接入电网,同时向电网 提供功能和服务。

#### 1 AWoC基本概念

#### 1.1 AWoC简介

AWoC是由许多在一定电力或物理边界内的微 系统和耦合点组成的整体系统,如附录A图A1所 示。这些微系统被称为元胞,主要由内部电源(包括 集中式电源和分布式电源)、负荷和边界联络线组 成,能够实现按照协议稳定进行边界功率交换的功 能。元胞划分主要依据为电力边界或行政区划,同 时考虑规划区域中的可再生能源分布情况、负荷密 度等。

耦合点系统的应用是AWoC与传统WoC之间的 主要区别,其由储能、联络线、断路器、中央控制单 元、通信系统等组成,用于提供支持与服务、协调功 率传输策略以及控制电网运行状态。在高渗透率可 再生能源发电的AWoC中,耦合点可以降低可再生 能源发电带来的不确定性和波动性,提高电网消纳 能力以及可再生能源发电渗透率。

#### 1.2 AWoC控制运行模式

不同于传统电网的集中控制体系,AWoC采用的是分层分布式的控制模式,如图1所示。每个元胞都有各自的运营商和元胞控制器CC(Cell Controller)。每个元胞由内部CC实现自治管理及与其他元胞之间的协同控制,这种结构遵循了分布式可再生能源的就地消纳,同时可以发挥集群效果。AWoC还在CC之上的耦合点处设立元胞系统控制CSO(Cell System Operator),用以辅助完成周围元胞的协同控制,CSO的主要作用是接收下层CC上传的决策并进行整体评估,并将评估结果发送给下层CC,同时向其提供电力市场交易情况、天气预报等数据支持<sup>[14]</sup>。



Fig.1 Control mode of AWoC

AWoC的运行模式是与上述控制模式相互配合的基于耦合点和联络线控制的聚、散多状态运行模式,以适应不同的运行情况。元胞在运行过程中都有聚、散2种运行状态:聚状态是指元胞通过联络线和耦合点连接在主网中的状态;散状态是指1个或多个元胞和耦合点不以任何形式和主网连接的状态,当多个元胞和耦合点(数量远小于主网元胞数)以互相连接的形式从主网中脱离时,也将这些元胞视为处于散状态。

WoC的正常运行状态为聚状态,在该状态下的 元胞之间通过联络线进行电能和服务交易,同时随 时改变部分联络线的通断状态以达到潮流最优的效 果。当元胞中出现故障时,会紧急切入散状态运行, 以防止故障扩大进而影响主网的正常运行。

## 2 AWoC 电源及耦合点规划和评估方法

#### 2.1 目标函数

目标函数为电源和耦合点总的经济费用现值*f* 最小,包括初始投入费用*f*<sub>1</sub>、维护费用*f*<sub>2</sub>、环保节省费用*f*<sub>3</sub>这3个部分,如式(1)所示。

$$\min f = f_1 + f_2 - f_3 \tag{1}$$

$$f_1 = f_{\rm DG} + f_{\rm CP} \tag{2}$$

$$f_{\rm DG} = \sum_{i=1}^{n} (\delta_{\rm PVi} f_{\rm PV} P_{\rm PVi} + \delta_{\rm WTi} f_{\rm WT} P_{\rm WTi} + \delta_{\rm GTi} f_{\rm GT} P_{\rm GTi}) \quad (3)$$

$$f_{\rm CP} = \sum_{l=1}^{N} (f_{\rm ESC} C_{\rm ESl} + f_{\rm other}) \tag{4}$$

其中, $f_{DC}$ 为元胞内分布式电源初始投入费用; $f_{CP}$ 为 耦合点初始投入费用;n为节点总数; $\delta_{PVi}$ 表示第i个 节点是否安装光伏电站,其值为1表示安装,为0表 示不安装; $f_{PV}$ 为单位容量光伏电站的初始投入费 用; $P_{PVi}$ 为第i个节点安装光伏电站的装机容量; $\delta_{WT}$ 表示第i个节点是否安装风电机组,其值为1表示安 装,为0表示不安装; $f_{WT}$ 为单位容量风电机组的初 始投入费用; $P_{WT}$ 为第i个节点安装风电机组的装机 容量; $\delta_{GT}$ 表示第i个节点是否安装燃气轮机发电机 组,其值为1表示安装,为0表示不安装; $f_{GT}$ 为单位 容量燃气轮机发电机组的初始投入费用; $P_{GTi}$ 为第i个节点安装燃气轮机发电机组的装机容量;N为耦 合点总数; $f_{ESC}$ 为耦合点储能装置单位储能量的初 始投入费用; $C_{ESl}$ 为帮l个耦合点安装储能装置的最 大储能量; $f_{ober}$ 为耦合点配套设施的建设费用。

2)维护费用。

 $f_{\rm DC} =$ 

$$f_2 = f_{\mathrm{DG}_{\mathrm{m}}} + f_{\mathrm{CP}_{\mathrm{m}}} \tag{5}$$

$$\sum_{t=0}^{T} \frac{1}{(1+r)^{t}} \sum_{i=1}^{n} (\delta_{PVi} f_{PV_{m}} P_{PVi} + \delta_{WTi} f_{WT_{m}} P_{WTi} + \delta_{GTi} f_{GT_{m}} P_{GTi})$$
(6)

$$f_{\text{CP}_{m}} = \sum_{t=0}^{T} \frac{1}{(1+r)^{t}} \sum_{l=1}^{N} (f_{\text{ESC}_{m}} C_{\text{ESl}} + f_{\text{other}_{m}})$$
(7)

其中, f<sub>DG\_m</sub>为元胞内分布式电源的年维护费用; f<sub>CP\_m</sub> 为耦合点年维护费用; T 为规划年限; r 为贴现率; f<sub>PV\_m</sub>为单位容量光伏电站的年维护费用; f<sub>WT\_m</sub>为单 位容量风电机组的年维护费用; f<sub>GT\_m</sub>为单位容量燃 气轮机发电机组的年维护费用; f<sub>ESC\_m</sub>为耦合点储能 装置单位储能量的年维护费用; f<sub>other\_m</sub>为耦合点配套 设施的年维护费用。

3)环保节省费用。

分布式可再生能源发电(尤其是风电、光电)的 碳排放量远远小于传统火力发电,因此,分布式可再 生能源发电可以减少企业碳排放量,从而降低成本。 环保节省费用为:

$$f_{3} = \sum_{t=0}^{T} \frac{1}{(1+r)^{t}} k_{CO_{2}} C_{CO_{2}} \sum_{i=1}^{n} (t_{\max, PV} \delta_{PVi} P_{PVi} + t_{\max, WT} \delta_{WTi} P_{WTi})$$
(8)

其中,k<sub>co2</sub>为燃煤机组产生单位发电量的碳排放量, 单位为t/(kW·h)<sup>[11]</sup>;C<sub>co2</sub>为单位碳排放量成交价, 单位为元/t,其值参考中国碳排放交易网数据; t<sub>max,PV</sub>为光伏电站年最大工作时间;t<sub>max,WT</sub>为风电机组 年最大工作时间。

#### 2.2 约束条件

1)源荷平衡约束。

所有分布式电源的总装机容量应不小于所有元 胞的总负荷量,即:

$$\sum_{j=1}^{n} P_{\text{load.max},j} \leq \sum_{i=1}^{n} (\delta_{\text{PV}i} P_{\text{PV}i} + \delta_{\text{WT}i} P_{\text{WT}i} + \delta_{\text{GT}i} P_{\text{GT}i}) \quad (9)$$

其中,P<sub>load.max,j</sub>为第j个节点的最大负荷。

所有燃气轮机的总装机容量应不小于所有元胞 负荷最大值的一定比例,即:

$$k_{\rm GT} \sum_{j=1}^{n} P_{\rm load,max,j} \leq \sum_{i=1}^{n} \delta_{\rm GTi} P_{\rm GTi}$$
(10)

其中,k<sub>GT</sub>为元胞网络需要燃气轮机承担的负荷比例。

所有耦合点的储能总装机容量应不小于所有元 胞负荷最大值的一定比例,即:

$$k_{\rm ES} \sum_{j=1}^{n} P_{\rm load, max, j} \leq \sum_{l=1}^{N} P_{\rm ESl}$$
(11)

其中, P<sub>Esl</sub>为第 l个耦合点的储能装机容量; k<sub>Es</sub>为元 胞网络需要耦合点储能承担的负荷比例。

在可靠性要求较高的情况下,需要 $k_{\text{rs}} + k_{\text{cr}} > 1$ 。

2)燃气轮机约束。燃气轮机的装机容量应不小 于所在元胞的负荷最大值,即:

$$\sum_{i=1}^{n_i^-} P_{\text{load.max},j} \leq P_{\text{GT}i}$$
(12)

其中,n<sup>GT</sup>为第i个燃气轮机节点所在元胞的节点数。

3)风电约束。风电机组的装机容量应不小于所 在元胞最大负荷的一定比例,即:

$$k_{\rm WT} \sum_{j=1}^{n_i} P_{\rm load.max,j} \leq P_{\rm WTi}$$
(13)

其中, k<sub>wr</sub>为风电机组装机容量需要满足所在元胞内 最大负荷的比例; n<sup>wr</sup>为第 i 个风电机组节点所在元 胞的节点数。

4) 光电约束。光伏电站的装机容量应不小于所 在元胞最大负荷的一定比例, 即:

$$k_{\rm PV} \sum_{j=1}^{n_i^+} P_{\rm load,max,j} \leq P_{\rm PVi} \tag{14}$$

其中,*k*<sub>PV</sub>为光伏电站装机容量需要满足所在元胞内 最大负荷的比例;*n*<sup>PV</sup>为第*i*个光伏电站节点所在元 胞的节点数。 5)耦合点约束。耦合点储能装置应能维持其所 连接的最大负荷的元胞在最大负荷量下工作一定时 长以上,协助其电源离网时在散状态下完成故障 恢复。

$$\max_{k \in C_{\text{cellcoupl}}} \sum_{j=1}^{n_k} P_{\text{load.max},j} \leq P_{\text{ES}i}$$
(15)

$$k_{\rm re} \max_{k \in C_{\rm cellcoupl}} \sum_{j=1}^{n_k} P_{\rm load,max,j} \leq k_{\rm p} C_{\rm ESl}$$
(16)

其中,*C*<sub>cellcoupl</sub>为和第*l*个耦合点相连的元胞编号集合; *n*<sub>k</sub>为第*k*个元胞内的节点数;*k*<sub>re</sub>为所有储能装置最 大储能量要维持其所连接的最大负荷的元胞在最大 负荷量下工作的时长;*k*<sub>p</sub>为0.4~0.8间的常数,一般 蓄电池的正常工作范围为最大储能量的40%~80%。

#### 2.3 规划方案的评估指标

从经济性和可靠性两方面对AWoC的电源及耦 合点规划方案进行评估。

经济性评估指标 *E*<sub>sc</sub>为总投资费用现值和初始 投入费用的加权平均,即:

$$E_{\rm SC} = \delta_{C_{\rm P}} C_{\rm P} + \delta_{C_{\rm I}} C_{\rm I} \tag{17}$$

其中, $\delta_{c_p}$ 为总投资费用现值权重,取为0.3; $C_p$ 为总 投资费用现值,参考式(1); $\delta_{c_1}$ 为初始投入费用权重, 取为0.7; $C_1$ 为初始投入费用,参考式(2)。

可靠性评估指标 $R_{PS}$ 由供电可靠率表示,如式 (18)所示。

$$R_{\rm PS} = \left(1 - \frac{t_{\rm ave}}{t_{\rm total}}\right) \times 100 \%$$
 (18)

其中,tave为用户平均停电时间;ttotal为统计时间。

#### 3 算例分析

#### 3.1 算例网络基本信息

以某地区 35 kV 配电网为参考,所需要的电源 容量为 2 400 MW,假定规划年限为 20 a。光伏电站 建设成本  $f_{PV} = 6000 \pi / kW$ ;风电场建设成本  $f_{WT} =$ 8 830 元 / kW<sup>[15]</sup>;燃气轮机发电机组建设成本  $f_{CT} =$ 2 800 元 / kW<sup>[16]</sup>;耦合点储能装置单位最大储能量 的初始投入费用  $f_{ESC} = 2695 \pi / (kW \cdot h)^{[17]}$ ;耦合点配 套设施的建设费用  $f_{other} = 100000 \pi$ ;年维护费用均取 建设费用的 0.5%;燃煤机组单位发电量的碳排放量  $k_{CO_2} = 9 \times 10^{-4} t / (kW \cdot h)^{[18]}$ ;单位碳排放量成交价  $C_{CO_2}$ 参考中国碳排放交易网上海地区数据,取为41.8元 / t; 分布式电源年最大工作时间  $t_{max,WT} = 2000 h^{[19]} t_{max,PV} =$ 1 200  $h^{[20]}$ ;贴现率 r = 5%; $k_p = 0.4$ 。

#### 3.2 参数选取对规划方案的影响

以地理位置和行政区划为主要依据将规划区 域划分为2种元胞基本划分方案,见附录A图A2。 本文电源及耦合点规划模型中包含多个和可再 生能源发电渗透率、规划区域及单元胞源荷匹配、储 能系统最大储能量配置等相关的参数,包括元胞网 络需要燃气轮机承担的负荷比例系数 k<sub>GT</sub>、元胞网络 需要储能承担的负荷比例系数 k<sub>ES</sub>、风电机组和光伏 电站装机容量需要满足所在元胞内最大负荷的比例 k<sub>WT</sub> 和 k<sub>PV</sub>,以及所有储能装置最大储能量要维持其 所连接的最大负荷的元胞在最大负荷量下工作的 时长 k<sub>w</sub>。

由于可调参数相对较多,因此首先根据参数对 可再生能源发电渗透率的影响趋势进行归类划分, 将影响趋势一致的参数划分为一组。k<sub>GT</sub>和k<sub>ES</sub>是对 规划区域源荷匹配进行限制,与可再生能源发电渗 透率在整体上呈现负相关,作为一组进行讨论;k<sub>wT</sub> 和k<sub>PV</sub>是对元胞内的源荷匹配进行限制,与可再生能 源发电渗透率在整体上呈现正相关,作为一组进行 讨论;k<sub>re</sub>是对储能系统最大储能量进行限制,与可再 生能源发电渗透率无关,单独进行讨论。下面以其 中2组数据作为控制变量,分析另一组数据对规划 方案的影响。

1)给定 $k_{cr}=0.4$ 、 $k_{es}=0.2$ 和 $k_{re}=1$ ,随机选取 $k_{wr}$ 和 $k_{pv}$ ,得到这2个参数和经济性评估指标 $E_{sc}$ 及可靠性评估指标 $R_{Ps}$ 的关系散点图以及可再生能源发电渗透率和经济性评估指标 $E_{sc}$ 及可靠性评估指标 $R_{Ps}$ 的关系散点图,分别如图2和图3所示。

通过分析发现,在限定 k<sub>cr</sub>和 k<sub>ES</sub>后,电源及耦合 点规划方案的建设成本随 k<sub>wr</sub>和 k<sub>PV</sub>的增大而增大, 而稳定性随这 2 个参数的变化呈现先下降后上升的 趋势,通过 R<sub>PS</sub>随可再生能源发电渗透率的变化趋势 也可以发现该规律,这说明随着可再生能源发电接 入电网,其不稳定性和随机性会对电网稳定性造成



图 2  $k_{\text{GT}}=0.4$ 、 $k_{\text{ES}}=0.2$ 、 $k_{\text{re}}=1$ 时 $E_{\text{SC}}$ 和 $R_{\text{PS}}$ 随 $k_{\text{WT}}$ 和 $k_{\text{PV}}$ 的 变化情况

Fig.2 Variation condition of  $E_{\rm SC}$  and  $R_{\rm PS}$  with  $k_{\rm WT}$ and  $k_{\rm PV}$  when  $k_{\rm CT}$ =0.4,  $k_{\rm FS}$ =0.2 and  $k_{\rm rr}$ =1





Fig.3 Variation condition of  $E_{\rm SC}$  and  $R_{\rm PS}$  with renewable energy generation penetration rate when  $k_{\rm CT}$ =0.4,  $k_{\rm PS}$ =0.2 and  $k_{\rm m}$ =1

较大的影响,但是随着可再生能源接入量的增大,该 影响会逐步降低,同时建设成本会随之升高。此外, 二元胞电网方案相对于三元胞电网方案的经济性和 稳定性整体上都较差。

2)给定 $k_{wr}$ =0.4、 $k_{pv}$ =0.4和 $k_{re}$ =1,随机选取 $k_{cr}$ 和 $k_{rs}$ ,得到这2个参数和经济性评估指标 $E_{sc}$ 及可靠性评估指标 $R_{ps}$ 的关系散点图以及可再生能源渗发电透率和经济性评估指标 $E_{sc}$ 及可靠性评估指标 $R_{ps}$ 的关系散点图,分别如图4和图5所示。

通过分析发现,在限定 k<sub>wr</sub>和 k<sub>pv</sub>后,电源及耦合 点规划方案的建设成本和 k<sub>cr</sub>的关系在一个临界点 后呈现正相关,稳定性在这个临界点后呈现逐渐上 升最后趋近于100%的趋势,这个临界点存在的原 因是存在一个所有电源装机容量大于负荷量的约束 条件,因此在 k<sub>cr</sub>小于该临界点时,由于要维持总体 源荷平衡,燃气轮机装机容量不会再继续下降。在 限定元胞可再生能源源荷匹配参数后,可再生能源 发电渗透率仅与 k<sub>cr</sub>有关,k<sub>cr</sub>越大渗透率越低,因而 E<sub>sc</sub>和 R<sub>ps</sub>与可再生能源发电渗透率的关系曲线呈现



图 4  $k_{WT}$ =0.4、 $k_{PV}$ =0.4、 $k_{re}$ =1 时 $E_{SC}$ 和 $R_{PS}$ 随 $k_{GT}$ 和 $k_{ES}$ 的 变化情况

Fig.4 Variation condition of  $E_{\rm SC}$  and  $R_{\rm PS}$  with  $k_{\rm GT}$ and  $k_{\rm FS}$  when  $k_{\rm WT}$ =0.4,  $k_{\rm PV}$ =0.4 and  $k_{\rm re}$ =1



198

- 图 5 k<sub>wr</sub>=0.4、k<sub>pv</sub>=0.4、k<sub>re</sub>=1 时 E<sub>sc</sub>和 R<sub>ps</sub>随可再生 能源发电渗透率的变化情况
- Fig.5 Variation condition of  $E_{\rm SC}$  and  $R_{\rm PS}$  with renewable energy generation penetration rate when  $k_{\rm WT}$ =0.4,  $k_{\rm PV}$ =0.4 and  $k_{\rm rr}$ =1

单一变化趋势,即随着渗透率升高,经济性提升,可 靠性降低。储能装置的建设成本和对元胞电网的可 靠性影响主要与最大储能量相关,而与装机容量无 关,因而与装机容量相关的k<sub>ss</sub>变化对可靠性和经济 性没有影响。同样,二元胞电网方案相对于三元胞 电网方案的经济性和稳定性整体上都较差。

3)限定  $k_{wr}$ =0.4、 $k_{pv}$ =0.4、 $k_{cr}$ =0.4和  $k_{es}$ =0.2,随机 选取  $k_{es}$ ,得到该参数和经济性评估指标  $E_{sc}$ 及可靠性 评估指标  $R_{ps}$ 的关系散点图,如图 6所示。由于  $k_{e}$ 不 会直接影响可再生能源渗透率,因此不对该情况下 的渗透率和评估指标的关系进行分析。



when  $k_{WT}=0.4$ ,  $k_{PV}=0.4$ ,  $k_{GT}=0.4$  and  $k_{ES}=0.2$ 

通过分析发现,在限定 $k_{WT}$ 、 $k_{PV}$ 、 $k_{CT}$ 和 $k_{ES}$ 后,电 源及耦合点规划方案的 $E_{SC}$ 和 $R_{PS}$ 与 $k_{re}$ 的关系均呈 现正相关,这说明配置储能装置可以降低可再生能 源对电网可靠性的影响,但是也会增加电网建设成 本。同样,二元胞电网方案相对于三元胞电网方案 的经济性和稳定性整体上都较差。

#### 3.3 规划方案对比分析

通过上述对不同参数情况进行统计分析,得到 多组不同的规划方案,从中选取10组比较有代表性 的规划方案进行整体分析,如附录A表A1所示。

通过对10组方案的分析可以得到以下结论:通过对方案1-5的对比分析可以发现,在耦合点数量

一定时,多划分元胞有利于电网经济性和可靠性的 提升;通过对方案6-8的对比分析可以发现,可再 生能源发电的接入对电网经济性和可靠性造成了较 大的冲击,随着可再生能源发电渗透率的提高,电网 经济性下降,而可靠性呈现先下降后上升的趋势,这 和前述分析相一致;通过对方案9和10的对比分析 可以发现,提高储能系统的最大储能量可以进一步 提高电网稳定性,但由于储能的高成本,经济性会随 之大幅下降。

在实际电网规划中,可以根据规划地点的实际 情况选择方案,如:在对电网质量要求不高且可再生 能源丰富的偏远郊区、农场、牧场等地,可以使用方 案3这种高可再生能源发电渗透率、经济性较高但 可靠性较低的方案;在负荷集中对可靠性要求较高 的地区可以使用方案8这种高可靠性的方案,另外 可以增大储能设备储能量以进一步提高地区电网的 可靠性;一般地区的规划则可以使用方案7这种综 合考虑经济性和可靠性的方案,同时较高的可再生 能源发电渗透率也有利于保护环境以及减少对不可 再生能源的消耗。

上述算例和评估是在忽略一些前提条件下进行 的,但是在一定程度上也切实反映了AWoC电源以及 耦合点规划的相关情况。总体而言,在当前分布式 可再生能源发电高成本、低稳定性的前提下,完全取 代传统能源发电在经济性和可靠性上是不合适的, 但是利用可再生能源发电配合储能以及不可再生能 源发电使得AWoC具有实现的可能性,未来随着技 术升级,低成本的可再生能源发电将会在AWoC中 起到关键作用。耦合点作为AWoC特有的系统结 构,结合储能之后在控制电网运行的同时也向电网 提供一定的服务,这会使得电网的可靠性有更大的 提升。

#### 4 结论

本文研究 AWoC 的模式和规划方法,提出基于 耦合点和联络线控制的 AWoC 聚、散多状态控制运 行模式,并在此基础上提出含耦合点的电源及规划 方法并进行建模分析。通过 AWoC 模式耦合点系统 实现的多元胞划分及聚、散多状态运行模式,可以有 效发挥多能发电互补作用,从而降低可再生能源发 电接入电网时产生的不确定性和波动性,为高渗透 率可再生能源发电接入电网提供全新的思路。同时 元胞的划分方式及规划方案的评估也可以给微电网 规划、配电网网格化规划和单元规划等提供一定的 借鉴。

AWoC因其灵活性和可拓展性,可以很好地适应各个规划区域的实际情况和电力负荷发展情况,



为新趋势下电力系统的发展提供新思路。后续工作将主要集中在完善AWoC理论体系、对规划与运行进行结合研究以及对配电网网格化规划和单元制规划进行对比。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 国家电网公司. 城市电力网规划设计导则:Q/GDW 156-2006[S]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] ADAM K,MULLERMIENACK M,PAUN M,et al. E-HIGHWAY 2050-The ENTSO-E facilitated study programme towards a modular development plan on pan-European electricity highways system 2050[C] //2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,CA,USA:IEEE,2012:1-6.
- [3] D'HULST R, FERNANDEZ J M, RIKOS E, et al. Voltage and frequency control for future power systems: the ELECTRA IRP proposal[C]//2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies(EDST). Vienna, Austria: IEEE, 2015: 245-250.
- [4] 周孝信. 新一代电力系统与能源互联网[J]. 电气应用,2019, 38(1):4-6.
- [5]卫志农,佘爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力 系统自动化,2013,37(13):1-9.
   WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):1-9.
- [6] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. Consortium for electric reliability technology solutions white paper on integration of distributed energy resources the CERTS microgrid concept[R]. California, USA: CERTS, 2002.
- [7]张沈习,李珂,程浩忠,等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):45-51.
   ZHANG Shenxi,LI Ke,CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015, 35(11):45-51.
- [8]张建华,曾博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报,2014,29(2):13-23.
  ZHANG Jianhua,ZENG Bo,ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning
  [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29 (2):13-23.
- [9] MARTINI L, RADAELLI L, BRUNNER H, et al. ELECTRA IRP approach to voltage and frequency control for future power systems with high DER penetrations [C] //CIRED2015-The 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Lyon, France: [s.n.], 2015:1-4.
- [10] 李越嘉,杨莹,常国祥.微电网技术在中国的研究应用现状和 前景展望[J].中国电力,2016,49(增刊1):154-158,165.
  LI Yuejia,YANG Ying,CHANG Guoxiang. Present situation of research and application on microgrid technology and its prospects in China[J]. Electric Power, 2016,49(Supplement 1): 154-158,165.
- [11] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用 [J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.

LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):8-16.

- [12] 孙国强,钱苇航,黄文进,等.考虑配电网安全性的虚拟电厂优 化调度博弈模型[J].电力自动化设备,2019,39(5):7-14.
   SUN Guoqiang,QIAN Weihang,HUANG Wenjin, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):7-14.
- [13] GUILLO-SANSANO E,SYED M H,DAMBRAUSKAS P,et al. Transitioning from centralized to distributed control:using SGAM to support a collaborative development of web of cells architecture for real time control[C]//CIRED Workshop 2016. Helsinki, Finland:Institution of Engineering and Technology, 2016:1-4.
- [14] CABIATI M,TORNELLI C,MARTINI L. The ELECTRA Webof-Cells control architecture concept for the future power system operation[C]//2018 AEIT International Annual Conference. Bari, Italy:IEEE, 2018:1-6.
- [15] 能源情报中心.全球风电项目成本趋势分析[EB/OL].(2018-04-17)[2020-05-15].https://zhuanlan.zhihu.com/p/35771329.
- [16] 崔佳宇. 燃气发电成本计算方法分析与研究[J]. 华北电业, 2015(5):72-73.
- [17] 北极星储能网. 锂电池储能系统成本分析:储能总容量越大分 摊至单位容量其他成本越低[EB / OL]. (2019-01-08)[2020-05-15]. http://chuneng.bjx.com.cn / news / 20190108 / 954852. shtml.
- [18] 刘睿,翟相彬.中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J].生态 环境学报,2014,23(7):1164-1169.
  LIU Rui,ZHAI Xiangbin. Calculation of carbon emissions from China coal plants and the reduction suggestion[J]. Ecology and Environmental Sciences,2014,23(7):1164-1169.
- [19] 国家能源局.2019年风电并网运行情况[EB/OL].(2020-02-28)[2020-05-15]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c\_138827910.htm.
- [20] 国家能源局.2019年光伏发电并网运行情况[EB/OL].(2020-02-28)[2020-05-15].http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/ c\_138827923.htm.

#### 作者简介:



赵鹏臻(1998—),男,山东青岛人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统规划 (E-mail:809563642@qq.com);

徐 谦(1963—),男,浙江宁波人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划(E-mail:qian\_xu\_0207@163.com);
谢 宁(1973—),女,新疆乌鲁木齐人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统

赵鹏臻

安全稳定、电力系统经济运行以及智能电网 (E-mail:xiening@sjtu.edu.cn);

王承民(1973—),男,辽宁大连人,教授,博士,主要研究 方向为电力系统经济运行、电力系统规划、电力市场以及智 能电网(E-mail;wangchengmin@sjtu.edu.cn);

王 蕾(1982—),女,河北邢台人,高级工程师,硕士,主 要从事配电系统规划与系统分析方面的研究工作(E-mail: wang\_lei1@zj.sgcc.com.cn);

邹 波(1989—), 男, 重庆人, 高级工程师, 博士, 主要 从事电网规划、综合能源规划等方面的研究工作(E-mail: eebzou@zj.sgcc.com.cn)。



# Planning method of power sources and coupling points based on autonomous web-of-cell mode

ZHAO Pengzhen<sup>1</sup>, XU Qian<sup>2</sup>, XIE Ning<sup>1</sup>, WANG Chengmin<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, ZOU Bo<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China)

**Abstract**: Aiming at the limitations of traditional power grid modes, the AWoC(Autonomous Web-of-Cell) is proposed, and its mode and basic planning method are introduced. The planning of power sources and coupling points is mathematically modeled and an evaluation method of planning scheme is established. The example simulation with the actual load situation of an area is carried out, and the results show that multi-cell partition of AWoC has advantages in reliability and economy, and AWoC provides a new effective attempt for connecting high permeability renewable energy generation and energy storage to power grid. **Key words**: AWoC; coupling point; power grid planning; power source location and capacity determination; penetration rate; renewable energy generation

(上接第193页 continued from page 193)

# Influence of commutation failure of HVDC transmission on synchronous condenser with static eccentric failure

MA Minghan, HE Pengkang, LI Yonggang, JIANG Meng, WU Yucai

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To study the influence of commutation failure of HVDC inverters on SC (Synchronous Condenser) with static eccentric failure, firstly a TTS-300-2 dual internal water-cooled SC is used as the research object, the field-circuit-network coupling model of HVDC transmission with SC is constructed based on Simulink+ Maxwell / Simplorer, and the air-gap magnetic flux field of SC with different static eccentricity is obtained by co-simulation. Secondly, the influence of commutation failure on the air-gap magnetic flux density of the SC with different static eccentricity is analyzed, and the Maxwell stress tensor method is used to calculate the unbalanced magnetic tension of the rotor before and after the commutation failure. Finally, the nonlinear Newmark implicit integration method is adopted to calculate the influence of the commutation failure increases the air-gap magnetic flux field of SC with static eccentric failure, and the magnetic tension and vibration amplitude of rotor increase significantly. The influence of commutation failure increases with the increase of static eccentricity. The analysis of the influence of the commutation failure on SC with static eccentric failure has certain reference value for explaining the abnormal vibration of SC and diagnosing the static eccentric failure.

Key words: HVDC transmission; synchronous condenser; commutation failure; finite element analysis; static eccentric failure; unbalanced magnetic tension

# 附录 A:



图A1 AWoC概念图 Fig.A1 Concept diagram of AWoC



(a)二元胞电网

(b)三元胞电网

图A2 某地区 35 kV配电网元胞基本划分

Fig.A2 Basic cell division of 35 kV distribution network in a certain area

	参数	方案1	方案2	方案3	方案4	方案 5
	元胞划分数	3	2	3	2	2
基	$k_{ m GT}$	0.400 0	0.400 0	0.400 0	0.400 0	0.400 0
本	$k_{ m ES}$	0.200 0	0.200 0	0.200 0	0.200 0	0.200 0
参	$k_{ m WT}$	0.303 6	0.105 8	0.808 5	0.653 4	0.188 3
数	$k_{ m PV}$	0.524 4	0.308 5	0.793 6	0.150 3	0.615 8
	$k_{ m re}$	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
基	$P_{\rm PV}/{ m kW}$	$3.67 \times 10^{5}$	$4.32 \times 10^{5}$	$5.56 \times 10^{5}$	$2.10 \times 10^{5}$	$8.62 \times 10^{5}$
本	$P_{\rm WT}/{ m kW}$	$2.13 \times 10^{5}$	$1.48 \times 10^{5}$	$5.66 \times 10^{5}$	$9.15 \times 10^{5}$	$2.64 \times 10^{5}$
配	$P_{\rm GT}/{ m kW}$	$1.820 \times 10^{6}$	$1.820 \times 10^{5}$	$1.279 \times 10^{6}$	$1.275 \times 10^{6}$	$1.274 \times 10^{6}$
置	$P_{\rm ES}/{ m kW}$	$1.000 \times 10^{6}$	$1.400 \times 10^{6}$	$1.000 \times 10^{6}$	$1.400 \times 10^{6}$	$1.400 \times 10^{6}$
	$C_{\rm ES}/~({\rm kW}{ullet}{\rm h})$	$2.500 \times 10^{6}$	$3.500 \times 10^{6}$	$2.500 \times 10^{6}$	$3.500 \times 10^{6}$	$3.500 \times 10^{6}$
经	<i>C</i> <sub>P</sub> /亿元	166.46	193.56	190.92	228.91	211.90
济	Esc/亿元	161.34	187.06	187.81	225.07	207.08
可	渗透率/%	24.149 9	24.164 7	46.727 4	46.883 7	46.908 0
靠	$R_{ m PS}/\%$	99.967 2	99.960 4	98.748 5	97.164 3	96.560 2
	参数	方案 6	方案7	方案8	方案9	方案 10
	元胞划分数	3	3	3	3	3
基	$k_{ m GT}$	0.606 1	0.602 5	0.600 0	0.400 0	0.400 0
本	$k_{\rm ES}$	0.411 9	0.393 7	0.400 0	0.200 0	0.200 0
参	$k_{ m WT}$	0.400 0	0.800 0	0.987 0	0.800 0	0.800 0
数	$k_{ m PV}$	0.400 0	0.800 0	0.995 2	0.800 0	0.800 0
	$k_{ m re}$	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	2.000 0
基	$P_{\rm PV}/{ m kW}$	$2.80 \times 10^{5}$	$5.60 \times 10^{5}$	$6.97 \times 10^{5}$	5.60×10 <sup>5</sup>	$5.60 \times 10^{5}$
本	$P_{\rm WT}/{ m kW}$	$2.80 \times 10^{5}$	$5.60 \times 10^{5}$	$6.91 \times 10^{5}$	$5.60 \times 10^{5}$	$5.60 \times 10^{5}$
配	$P_{\rm GT}/{ m kW}$	$1.840 \times 10^{6}$	$1.446 \times 10^{6}$	$1.440 \times 10^{6}$	$1.280 \times 10^{6}$	$1.280 \times 10^{6}$
置	D /1.W/			1.000.001.00	$1.000 \times 10^{6}$	$1.000 \times 10^{6}$
	$P_{\rm ES}/{\rm K}{\rm W}$	$1.000 \times 10^{6}$	$1.000 \times 10^{6}$	$1.000 \times 10^{\circ}$	1.000 \lapha 10	
	$P_{\rm ES}/{\rm kW}$ $C_{\rm ES}/({\rm kW}{\ h})$	$1.000 \times 10^{6}$ $2.500 \times 10^{6}$	$1.000 \times 10^{6}$ $2.500 \times 10^{6}$	$1.000 \times 10^{6}$ $2.500 \times 10^{6}$	$2.500 \times 10^{6}$	$5.000 \times 10^{6}$
经	$C_{\rm ES}/{\rm kW}$ $C_{\rm P}/{\rm Z}\pi$	1.000×10 <sup>6</sup> 2.500×10 <sup>6</sup> 167.68	$1.000 \times 10^{6}$ $2.500 \times 10^{6}$ 195.69		2.500×10 <sup>6</sup>	$5.000 \times 10^{6}$ 262.63
经 济	C <sub>ES</sub> /(kW•h)           C <sub>P</sub> /亿元           E <sub>SC</sub> /亿元	$     1.000 \times 10^{6}     2.500 \times 10^{6}     167.68     162.60 $	$1.000 \times 10^{6}$ $2.500 \times 10^{6}$ 195.69 192.34			5.000×10 <sup>6</sup> 262.63 256.34
经 济 可	FES/KW       CES/(kW•h)       CP/亿元       ESC/亿元       渗透率/%	$     \begin{array}{r}       1.000 \times 10^{6} \\       2.500 \times 10^{6} \\       167.68 \\       162.60 \\       23.333 3     \end{array} $	$1.000 \times 10^{6}$ $2.500 \times 10^{6}$ $195.69$ $192.34$ $43.648 1$	$     \begin{array}{r}       1.000 \times 10^{6} \\       2.500 \times 10^{6} \\       214.43 \\       211.68 \\       49.072 4     \end{array} $	$     \begin{array}{r}       1.000 \times 10^{6} \\       2.500 \times 10^{6} \\       190.73 \\       187.60 \\       46.666 7 \\     \end{array} $	5.000×10 <sup>6</sup> 262.63 256.34 46.666 7

## 表A1 具有代表性的规划方案

## Table A1 Representative planning schemes