面向区域综合能源服务的电-水联合潮流

赵 霞,孙名轶,李欣怡,胡潇云

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:现有关于综合能源系统潮流的研究大多以电力、热力、燃气系统耦合形成的多能系统为研究主体,而少 量关于电-水联合系统潮流的研究又存在耦合方式单一、模型适应性差等问题。为此面向区域供电、供水综 合服务商,提出配电网、配水网耦合形成的区域电-水联合系统的潮流模型和计算方法。提出2种用户级电-水能源集线器模型以描述终端用户综合用能行为产生的电-水关联关系;在此基础上,考虑电-水之间的泵站 耦合和用户级能源集线器2种耦合方式,以及水负荷的水压特性,提出区域电-水联合潮流模型及计算方法; 用2个不同规模的区域电-水联合系统验证了所提潮流计算方法的有效性,并对比分析了用户级电-水能源 集线器及水负荷水压特性对联合潮流的影响。

关键词:综合能源系统;电-水联合系统;配电网;配水网;潮流;电-水能源集线器;压力驱动分析 中图分类号:TM 744 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202010013

0 引言

世界范围内日益严峻的能源与环境危机催生了 能源互联网、综合能源系统 IES(Integrated Energy System)等新型能源系统的快速发展^[1-2]。IES作为能 源互联网的物理载体,以打破电、气、热等多种能源 系统的行业壁垒,实现多种能源互联互济、综合利用 为基本特征,成为未来能源系统的重要发展方向^[2]。 近年来,国内外学者围绕 IES的建模、分析、规划、运 行和市场等问题开展了广泛研究,涉及电-气^[3]、电-热^[4]、电-气-热^[5]及电-交通^[6]联合系统等多种形式 的 IES。其中,由配电网、配气网、供热/供冷系统等 网络耦合形成的、为某个区域(如城市、城镇、园区、 社区等)提供综合供能服务的区域综合能源系统 (regional IES),其工程实践相对容易,成为 IES 的一 个重要研究领域和各国发展 IES 示范工程的首选 方案^[7]。

与电-气、电-热系统类似,电力系统和输配水 系统之间同样存在行业壁垒,长期处于独立规划、分 立运行的模式;另一方面,这2个系统又密切关联、 相互依存,主要表现在电力生产过程需要大量取水, 而水的提取、处理和输送又需要消耗大量电力。据 统计,美国火电厂冷却水需求量超过全社会取水量 的40%^[8],而我国社会水循环全过程的能耗超过全 国总用电量的19%,2014年仅取用地表水就消耗电 能2.535×10¹⁰ kW·h^[9]。

国内外已有大量研究关注水与能源之间的依存 关系(一般称为 water-energy nexus)和协调发展问

收稿日期:2020-02-17;修回日期:2020-08-10 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307186) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307186) 题[9-10],这些研究大多从能源与环境的宏观视角研究 某个国家 / 地区水资源和能源的供需关系、能源开 发利用的水资源约束、能源生产的水足迹及节水技 术,以及社会水循环过程中的能耗和节能问题。近 两年,随着对IES研究的不断发展和深化,国内外学 者开始立足于电力系统与输配水系统的相互影响来 研究水-能关系,提出将输配水系统纳入IES的框 架,用集成、融合的新思路来构建和发展电-水联合 系统IEWS(Integrated Electricity-Water System)。目 前,围绕IEWS的规划和运行问题,国内外已开展了 一些初步研究[11-15]。其中,文献[11]研究配电-配水 网的联合潮流计算;文献[12]考虑配电、配水网的网 络约束和泵站耦合环节,提出配电-配水联合系统的 最优潮流模型及其分布式协同优化算法;文献[13] 提出配电-配水网联合经济调度模型并采用粒子群 优化算法进行求解,以降低配水网运行成本和提高 风电消纳水平:文献[14]研究配电--配水联合系统的 规划问题以提高联合系统的韧性;文献[15]将配水 网作为电网的灵活性资源,研究考虑配水网调节能 力的机组组合问题。

与上述电-气、电-热等其他形式IES相比,关于 IEWS的研究才刚刚起步。此外,作为IES稳态分析 的核心和IES规划、运行及控制的基础,多能流建模 与计算一直是各种形式IES研究的一个基本问题, 也是刻画和分析IES中各子系统耦合关系及互动机 制的基本工具,但目前仅有文献[11]针对IEWS的潮 流问题进行了初步研究,提出配电-配水联合系统的 潮流模型及其顺序求解方法。然而,该研究还存在 以下不足:①仅考虑配电网和配水网之间的泵站耦 合方式,难以刻画终端用户用能行为产生的电-水关 联;②所提潮流模型仅以中性点接地配电网三相潮 流方程为基础,也未考虑水负荷水压特性和阀门元 件的水头损失,对实际配电网和配水网的适应性都 非常有限。

本文面向区域供电、供水综合能源服务商,研究 区域配电--配水联合系统(以下简称为区域IEWS)的 潮流模型及计算方法。首先,对电力系统潮流计算 和输配水系统水力计算进行对比分析;其次,考虑区 域IEWS终端用户的用能行为,提出2种用户级电-水能源集线器EH(Energy Hub)模型;在此基础上, 提出同时考虑配水网泵站及用户级电-水EH这2种 耦合方式的区域IEWS联合潮流模型和计算方法;最 后,用2个不同规模的区域IEWS算例验证所提方法 的有效性。

1 区域IEWS的潮流模型

1.1 区域IEWS的典型结构

区域IEWS的典型结构如图1所示。区域综合 能源服务商从上级电网及水库/水厂购电、购水,通 过区域IEWS向辖区内用户供电、供水。图中泵站是 与水库/水厂直接相连的送水泵站,此外,还可能存 在分散于配水网的加压泵站。泵站通过电力驱动水 泵来提升整个配水网或局部区域的水压,是配电网 和配水网最主要的耦合途径,也是现有研究^[11-15]唯 一考虑的电-水耦合环节。事实上,除了泵站耦合之 外,终端用户也会在配电网和配水网之间产生关联 作用。为描述这种关联关系,本文应用EH概念建 立2种典型的用户级电-水EH,并基于此建立同时 考虑泵站耦合和用户级电-水EH这2种耦合方式的 区域IEWS潮流模型。用户级电-水EH的具体结构 及模型详见下文。



图1 典型区域IEWS示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical regional IEWS

1.2 配电网潮流模型

对于35 kV及以上电压等级的高压配电网,一般 可以用对称系统的交流潮流方程建模,而对于35 kV 以下电压等级的中低压配电网,三相不平衡问题比 较突出,通常需要采用三相潮流方程。此外,根据中 低压配电网的接线方式(三线/四线)、中性点接地 方式,以及所接入分布式电源控制方式和负荷接线 方式(Y形/△形)的不同,其潮流模型也有区别。 以三相三线接地配电网为例,假设分布式电源三相 独立可控、负荷均采用中性点接地的Y形连接方式,则可采用如下三相潮流模型^[16]:

$$\begin{cases} P_{i}^{\varphi} = V_{i}^{\varphi} \sum_{k=1}^{N_{e}} \sum_{\psi=a,b,c} V_{k}^{\psi} \left[G_{ik}^{\varphi\psi} \cos\left(\delta_{i}^{\varphi} - \delta_{k}^{\psi}\right) + B_{ik}^{\varphi\psi} \sin\left(\delta_{i}^{\varphi} - \delta_{k}^{\psi}\right) \right] \\ Q_{i}^{\varphi} = V_{i}^{\varphi} \sum_{k=1}^{N_{e}} \sum_{\psi=a,b,c} V_{k}^{\psi} \left[G_{ik}^{\varphi\psi} \sin\left(\delta_{i}^{\varphi} - \delta_{k}^{\psi}\right) - B_{ik}^{\varphi\psi} \cos\left(\delta_{i}^{\varphi} - \delta_{k}^{\psi}\right) \right] \end{cases}$$

$$(1)$$

其中, $\varphi \in \{a, b, c\}; P_i^{\varphi} \neq Q_i^{\varphi} \beta \end{pmatrix}$ 为节点i的 φ 相注入的有功和无功功率; $V_i^{\varphi} \approx \delta_i^{\varphi} \beta$ 别为节点i的 φ 相电压模值和相角; $G_{k}^{\varphi \psi} \approx B_{k}^{\varphi \psi} \beta$ 别为配电网节点导纳矩阵对应节点 $i \land k \land \varphi \lor \psi$ 相的电导和电纳; N_e 为配电网节 点数。

1.3 配水网稳态水力计算模型

1.3.1 输配水系统与电力系统的对比

输配水系统(给水系统)一般包含输水管(渠)、 配水管网、水压调节设施(泵站、减压阀)及水量调节 设施(清水池、水塔、高位水池等)等组成部分。

输配水系统稳态计算常称为(稳态)水力计算、 管网平差计算。对于管道(非管渠)输配水系统,水 力计算一般假设水流为处于紊流态的恒定流^[17],最 重要的水力学参数为节点水头和管段流量。水头表 征流过任意管道断面或节点的单位重量水流所具有 的机械能,包含位置水头、压力水头和流速水头,分 别表示水流的位能、压能和动能,常用单位为米水柱 (mH₂O),简写为m。稳态水力计算中,一般可忽略 流速水头。流量为单位时间内流过某一管段断面的 水体积,常用单位为m³/s或m³/h。

输配水系统水力计算的基本任务是根据给定的 部分水力参数,通过求解恒定流方程组确定未知的 水力参数。在计算模型和方法方面,输配水系统水 力计算与电力系统潮流计算有很多相似之处,两者 的对比情况如表1所示。

表1 输配水系统与电力系统的对比

 Table 1
 Comparison of water transmission and distribution system and power system

项目	电力系统	输配水系统
主要元件	节点、 支路(线路、变压器)、 电源、电负荷	节点、 管段(管道、水泵)、 水源、水负荷
变量	电压、功率	水头、流量
节点类型	平衡节点、PV节点、 PQ节点	定压节点、 定流节点
支路特性	欧姆定律	沿程水头损失方程
基本定律	节点电流定律(KCL)、 回路电压定律(KVL)	质量守恒 (节点流量方程)、 能量守恒 (环能量方程)
主要稳态 计算方法	节点电压法、 回路电流法	节点水压法、 管段流量法

1.3.2 配水网元件模型

本文考虑配水网主要元件包括水源、配水管道、 水泵、蓄水池以及水负荷。

(1)水源与蓄水池。

水源一般抽象为节点元件,可以给定流量或水 头,分别对应定流节点和定压节点。配水网水力计 算至少需要设置1个定压节点,为全网提供水头基 准,类似于潮流计算中的平衡节点。蓄水池可建模 为节点元件或者管段元件,本文用给定流量的节点 元件来描述蓄水池,以流出节点流量的正/负表征 蓄水池处于蓄水/放水状态。

(2) 配水管道。

水在流动过程中会产生沿程水头损失和局部水 头损失。沿程水头损失描述的是水流因克服管道固 定边界面的摩擦和限制作用而损失的机械能,局部 水头损失是指水流通过阀门、弯管、三通 / 四通等附 件时产生的水头损失。

假设配水网水流为圆管满流,常用的沿程水头 损失公式有 Hazen-Williams公式、Darey-Weisbach公 式、Chezy-Manning公式等,其一般形式^[17]为:

$$\Delta H_{p,ij} = H_i - H_j = r_{p,ij} q_{p,ij} \left| q_{p,ij} \right|^{N-1}$$
(2)

其中,下标p表示管道;H_i、H_j分别为节点*i*、*j*的水头; q_{p,ij}为管道*i*-*j*的流量(水流方向由节点*i*到节点*j*为 正方向);r_{p,ij}为管道摩阻,与管道材质、直径及长度 等参数有关;N为水力指数。

本文选取 Darey-Weisbach 公式^[18]作为配水管道 沿程水头损失公式,则式(2)中 *N*=2,*r*_{p,i}为:

$$r_{\rm p,ij} = \frac{f_{\rm p,ij} L_{\rm p,ij}}{2g A_{\rm p,ij}^2 D_{\rm p,ij}}$$
(3)

其中,*L*_{p,ij}、*A*_{p,ij}和*D*_{p,ij}分别为管道长度、截面积和直径;*f*_{p,ij}为沿程阻力系数,与水流雷诺数、管材粗糙度 有关,一般由经验公式计算得到或根据管道材质直 接查表获取^[18];*g*为重力加速度。

阀门等附件产生的局部水头损失可以通过修正 管段长度来考虑,也可以将这些附件视为长度为0 的特殊管段,按式(4)计算局部水头损失^[18]。

$$\Delta H_{\mathbf{v},ij} = H_i - H_j = r_{\mathbf{v},ij} q_{\mathbf{v},ij} \left| q_{\mathbf{v},ij} \right| \tag{4}$$

其中,下标v表示阀门;q_{v,ij}为阀门*i-j*的流量;r_{v,ij}为局 部水头损失系数,计算公式如式(5)所示。

$$r_{v,ij} = \frac{\zeta_{v,ij}}{2gA_{v,ij}^2}$$
(5)

其中, $A_{v,ij}$ 为阀门过水断面面积; $\zeta_{v,ij}$ 为局部阻力系数,例如对于全开闸阀,可取 $\zeta_{v,ij}$ =0.19^[19]。

需要指出的是,由于 Darey-Weisbach 公式取 N=2,管道方程在形式上与阀门方程一致,下文讨论不再区分管道支路和阀门支路。

(3)水泵。

水泵向配水网提供机械能以提升水头,所提供的机械能用水泵扬程(水头增量)表示。对于常用的变速离心式水泵,其水力特性^[18]为:

$$\Delta H_{u,ij} = H_j - H_i = \omega_{ij}^2 H_{0ij} - c_{ij} \omega_{ij}^{2-m_{ij}} q_{u,ij}^{m_{ij}}$$
(6)

其中,下标u表示水泵; $q_{u,ij}$ 为水泵i-j的流量; H_{0ij} 、 c_{ij} 和 m_{ij} 分别为水泵i-j的静扬程、内阻系数和扬程指数,一般根据厂家提供的扬程曲线拟合得到; ω_{ij} 为水泵i-j的相对转速,即工作转速与额定转速之比。

(4)水负荷。

水负荷一般用定流节点表示,与潮流计算中 的恒功率负荷模型类似。基于定流水负荷所进行的 水力分析通常称为需求驱动分析 DDA (Demand-Driven Analysis)。然而,定流水负荷模型无法考虑 水负荷的水压特性,难以反映这些特殊负荷的水压 需求,从而导致 DDA 的水力计算结果很可能无法反 映配水网的真实运行状态。为此,本文引入压力驱 动分析 PDA (Pressure-Driven Analysis),按式(7)考 虑水负荷的水压特性^[20]。

$$q_{\mathrm{L},i} = \begin{cases} q_{\mathrm{L},i}^{\mathrm{req}} & H_i \ge H_{\mathrm{L},i}^{\mathrm{des}} \\ q_{\mathrm{L},i}^{\mathrm{req}} \left(\frac{H_i - H_i^{\mathrm{min}}}{H_i^{\mathrm{des}} - H_i^{\mathrm{min}}} \right)^{1/2} & H_{\mathrm{L},i}^{\mathrm{min}} < H_i < H_{\mathrm{L},i}^{\mathrm{des}} \\ 0 & H_i \le H_{\mathrm{L},i}^{\mathrm{min}} \end{cases}$$
(7)

其中,下标L表示负荷;q_{Li}和q^{res}分别为节点i水负荷的实际流量和期望流量(流出节点为正);H^{des}和H^{min}分别为水负荷的需求水头和最小水头。

1.3.3 配水网节点流量方程

根据质量守恒定律,配水网中各节点满足流量 平衡方程,即有:

$$q_{\mathrm{S},i} - q_{\mathrm{L},i} = \sum_{j \in i} q_{\mathrm{p},ij} + \sum_{j \in i} q_{\mathrm{v},ij} + \sum_{j \in i} q_{\mathrm{u},ij}$$
(8)

其中,*j*∈*i*表示节点*j*为与节点*i*相连的节点;*q*_{s,*i*}为接 入节点*i*的水源流量(流入节点为正)。当采用定流 模型时,*q*_{L,*i*}为给定常数,当考虑水负荷的水压特性 时,*q*_{L,*i*}为关于节点*i*水头的函数(见式(7))。

1.4 配电网和配水网的耦合

如上文所述,本文考虑电力驱动泵站和用户级 电-水EH这2种耦合方式。前者是配网层面的耦 合,而后者描述终端用户侧的电-水耦合关系。

(1)电力驱动泵站。

电力驱动泵站是配电网和配水网之间最主要的 耦合环节,泵站中可能设置2台或多台并列运行的 水泵。式(6)所示的水泵*i-j*消耗的电功率^[12]*P_{wi}*为:

$$P_{u,ij} = \frac{\rho g}{\eta_{u,ij}} \Delta H_{u,ij} q_{u,ij}$$
(9)

其中, ρ 为水的密度; $\eta_{u,i}$ 为水泵i-j的效率。

根据水泵实际接线方式,水泵消耗的电功率按 单相负荷或者对称三相Y形 / △形负荷接入配电网。 (2)用户级电-水EH。

根据终端用户的用能行为,本文提出2种用户 级电-水EH,其典型结构分别如图2(a)、(b)所示。 图中,P_{in}、q_{in}、H_{in}分别为输入功率、水流量和水头,P_{in} 和q_{in}分别以负荷形式接入配电网和配水网;P_{out}、q_{out}、 H_{out}分别为输出功率、水流量和水头;α为电水比,表 征电功率分配关系。



图 2 2种典型的电-水 EH Fig.2 Two typical types of electricity-water EH

Ⅰ型电-水EH的元件为变压器和增压泵,用以 描述对水压有特殊要求的终端用户。增压泵如上 文所述是配水网中的泵站用以提升全网或者局部区 域的水头(见图1),而对于这些特殊用户,一般通过 在供水前端设置增压泵来实现定点增压,以避免全 网水头过高导致漏水量增加。Ⅰ型电-水EH的方 程为:

$$\begin{bmatrix} P_{\text{out}} \\ q_{\text{out}} \\ H_{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\alpha)\eta_{\text{T}} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{\text{u}} & 0 \\ \alpha\eta_{\text{u}} & -\beta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{in}} \\ q_{\text{in}} \\ H_{\text{in}} \end{bmatrix}$$
(10)

其中, η_{T} 和 η_{u} 分别为变压器和水泵的能量转换效率; γ_{u} 为增压泵未计量用水UFW(Unaccounted-For Water)系数^[18],表征增压泵环节由于漏损、盗用水、未 计量服务或其他原因而造成的总流量消耗的一部 分; β 为增压泵内阻系数。

I型电-水EH有2种运行模式,分别称为"定电水比"模式(模式1)和"定增压泵扬程"模式(模式 2)。模式1下,电水比α给定,即输入电功率P_{in}按给 定比例供给增压泵;模式2下,增压泵需要提供的扬 程(即H_{out}-H_{in})给定。运行模式不同,电-水EH的待 求变量和潮流计算过程均有差异,详见下文。

区域IES中存在同时具有电、水需求的综合用 户或终端设备。本文根据综合用户的用水特性,将 其分为耗水型和再加工型两大类。耗水型电-水综 合用户包括化工、造纸、水泥加工等工业用户,以及 居民用户中的洗衣机、洗碗机等终端设备;再加工 型电-水综合用户包括商业/居民用户的电热水系 统、直饮水净化系统等。对于耗水型电-水综合用 户,可以近似认为输出水流量q_{out}=0,其综合特性可 以抽象为f(P_{in},q_{in})=0。本文重点讨论再加工型电-水综合用户,并用 II 型电-水 EH 刻画其电-水耦合 特性。II 型电-水EH 的方程为:

$$\begin{bmatrix} P_{\text{out}} \\ q_{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{\text{T}} \eta_{\text{EW}} & -\lambda_{\text{EW}} \\ 0 & \gamma_{\text{EW}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{in}} \\ q_{\text{in}} \end{bmatrix}$$
(11)

以电热水系统为例,式(11)中P_{in}和P_{out}分别为 输入电功率和输出热水的热功率;q_{in}和q_{out}分别为输 入冷水和输出热水的水流量;η_{EW}为电-热功率转换 效率;γ_{EW}为UFW系数;λ_{EW}为电热水系统的水-热转 换系数,表征热功率与输入流量的负相关特性。

值得一提的是,EH概念多用于表征能源的转换、存储和分配过程,体现能量守恒定律,而本文所提2种用户级电-水EH除能量转换过程(例如增压泵将电能转化为用水头表征的机械能,电-水EH将输入电能转化为动能、热能等其他形式)之外,还包括物质(水)的传输和分配,同时体现能量和质量守恒定律,是一种广义EH。

1.5 区域 IEWS 联合潮流方程及其可解性

根据配电网潮流模型(式(1))、配水网水力计算 模型(式(2)—(8))及耦合环节方程(式(9)—(11)), 可建立如下一般形式的联合潮流方程组:

$$\begin{cases} f_{\rm E}(\boldsymbol{V},\boldsymbol{\delta},\boldsymbol{x}_{\rm EW}) = 0\\ f_{\rm W}(\boldsymbol{H},\boldsymbol{q},\boldsymbol{x}_{\rm EW}) = 0\\ f_{\rm EW}(\boldsymbol{H},\boldsymbol{x}_{\rm EW}) = 0 \end{cases}$$
(12)

其中,下标 E、W 和 EW 分别表示配电网、配水网和 电-水耦合环节;V 和δ分别为配电网中待求的三相 电压模值和相角;H 和q分别为配水网中待求的节点 水头和支路流量;x_{ew}为电-水耦合环节的待求变量, 包括泵站的电功率、用户级电-水 EH 的输入功率、 输入流量和输出水头等。

鉴于配电网潮流模型已有较多讨论,下面仅针 对配水网和耦合环节,分析区域IEWS联合潮流方程 的可解性。假设配水网共有n个节点(含 n_s 个定压 节点)和m条支路(含 m_p 条水泵支路);耦合设备包 含水泵(m_p 个)和用户级电-水EH(其中 I型 n_1 个, II 型 n_2 个),配水网和耦合环节元件的待求变量和方程 情况如表2所示。

由表2可见,配水网与耦合环节的待求变量与 方程数目一致,满足联合潮流有解的基本条件。需 要注意的是,电-水EH的输入水头H_{in}也是待求变 量,但H_{in}同时也是电-水EH接入配水网节点的水 头,即计入表2中节点水头H_i,不再作为电-水EH的 待求变量。此外,若根据管段及水泵方程(式(2)、 (4)、(6))将支路流量表达为关于节点水头的函数 (即消去支路流量),则联合潮流方程(式(12))及表 2不再包含支路流量变量及支路方程。考虑到管段 及水泵方程的形式比较复杂,本文将节点水头和支 路流量同时作为待求变量。

表2 配水网与耦合环节元件的待求变量和方程

Table 2 Unknown variables and equations of water distribution network and linkage facilities

				-		
网络和亚伊		待求变量				
网络和儿什	数目	描述	数目	描述		
节点	$n-n_{\rm s}$	节点水头Hi	$n-n_{\rm s}$	节点流量平衡方程(式(8))		
支路	т	支路流量 q_{ij}	m	管段:水头损失方程(式(2)或式(4)) 水泵:扬程方程(式(6))		
水泵	$m_{_{\mathrm{p}}}$	水泵消耗电功率Pu	$m_{ m p}$	水泵能量转换方程(式(9))		
Ⅰ型电-水EH模式1	$3n_1$	输入功率 P_{in} 、流量 q_{in} ;输出水头 H_{out}	$3n_1$	I型电-水EH方程(式(10))		
Ⅰ型电-水EH模式2	$4n_1$	电水比 α ;输入功率 P_{in} 、流量 q_{in} ;输出水头 H_{out}	$4n_1$	I型电-水EH方程(式(10))、给定扬程 $H_{out}-H_{in}=C$		
Ⅱ型电-水EH	$2n_2$	输入功率P _{in} 、流量q _{in}	$2n_2$	Ⅱ型电-水EH方程(式(11))		

2 区域IEWS潮流模型的求解

由于区域IEWS联合潮流模型(式(12))是一组 非线性方程组,本文选用牛顿法进行求解。

与电-气、电-热IES联合潮流的求解^[21]类似,电-水联合潮流的求解可以采用联立求解或者分立求解 策略。联立求解也称为统一求解法,其核心是建立整 个联合潮流方程组(式(12))的雅可比矩阵;分立求解 法则根据电-水耦合关系,顺序或交替求解配水网水 力方程和配电网潮流方程。本文基于分立法求解区 域IEWS的潮流方程,其基本求解流程如图3所示。



图 3 区域 IEWS 联合潮流的求解流程

Fig.3 Flowchart for combined load flow solution of regional IEWS

需要特别指出以下2点。

(1)采用分立法求解区域联合潮流,可以采用管 网平差计算中常用的流量法或者水压法^[17]进行配水 网水力计算,而对于辐射型配电网也可以采用前推 回代法进行潮流计算。考虑到潮流计算方法对非辐 射型配电网的适应性以及配水网/配电网潮流建模 与求解方法的一致性,本文分别以节点潮流平衡和 节点流量平衡为基础建立配电网潮流方程和配水网 水力学方程,并统一选用牛顿法进行求解。此外,对 于配水网水力计算,本文同时将节点水头和支路流 量作为待求变量,其实质是一种流量-水头混合法。

(2)管道方程(式(2))含绝对值项,利用牛顿法求解时,迭代过程中根据管道当前的水流方向来处理式中的绝对值。局部水头方程(式(4))的处理方式类似。此外,对配水网进行 PDA 计算时,需要考虑式(7)所示的分段函数。此时,首先取水负荷流量初值为期望流量(即取 $q_{L,i} = q_{L,i}^{ee}$)进行配水网水力计算,得到水负荷水头 H_i 。若 $H_i \ge H_{L,i}^{des}$,则结束计算;否则根据 H_i 的取值范围,分别按式(7)第二、三式修正 $q_{L,i}$,重新进行水力计算,并根据计算所得结果再次修正 $q_{L,i}$,依此循环,直至收敛。

3 算例分析

为验证本文所提区域IEWS联合潮流模型及计 算方法的有效性,用2个规模不同的IEWS算例分析 用户级电-水EH运行模式以及水负荷水压特性对 区域IEWS联合潮流计算结果的影响。

3.1 算例1

算例1为IEEE 13节点配电网与7节点配水网 耦合形成的区域IEWS,接线图如图4所示,图中分 别用B和N区分配电网和配水网节点。配电网节点 B₈和B₁₃接入2个光伏电源;配电网节点B₁₃与配水网 节点N₃之间接入I型电-水EH,B₅和N₄之间接入II 型电-水EH;配电网节点B₈为配水网泵站供电。算



图 4 IEWS 算例 1 接线图 Fig.4 Wiring diagram of IEWS in Example 1

例1的详细数据见文献[22]。算例1用于验证本文 所提用户级电-水EH及区域IEWS联合潮流方法的 有效性。

为分析用户级电-水EH对联合潮流的影响, 考虑以下2种场景:场景1,I型电-水EH运行于模式1,电负荷 P_{out} =100 kW,水负荷 q_{out} =200 m³/h,取 电水比α分别为0.2、0.4、0.6。场景2,I型电-水EH 运行于模式2,增压泵扬程需求为100 m,水负荷 q_{out} 分别为100、200、300 m³/h,电负荷 P_{out} 及IEWS其余 参数同场景1。

应用本文所提联合潮流计算方法对上述2种场景(6种情况)进行潮流计算,所得潮流结果如表3、附录图A1及附录图A2所示。IEEE13节点配电网存在非全相运行支路,图A1及图A2仅给出全相运行支路两端节点的a相电压及支路总有功功率。

表 3	Ⅰ型由_;	k EH 在 2 种场暑	下的潮流结果
105	1 = -	N Li L L L L M の 家	

Table 3 Load flows of I-type electricity-water EH under two scenarios

场景	α	$\begin{array}{c} q_{\rm out} / \\ ({\rm m}^3 {\boldsymbol{\cdot}} {\rm h}^{-1}) \end{array}$	$\begin{array}{c} q_{\rm in}/\\ ({\rm m}^3{\boldsymbol{\cdot}}{\rm h}^{\text{-1}}) \end{array}$	$H_{\rm out}/~{\rm m}$	$H_{\rm in}/{\rm m}$	$P_{\rm in}$ / kW
	0.2	200.00	202.02	94.22	86.92	138.89
1	0.4	200.00	202.02	140.06	86.92	185.20
	0.6	200.00	202.02	231.72	86.92	277.80
	0.52	100.00	101.01	187.82	87.82	233.40
2	0.55	200.00	202.02	186.92	86.92	244.70
	0.57	300.00	303.03	185.96	85.96	255.90

3.1.1 对场景1的分析

由表3及图A1可见,场景1中3种情况下 I 型 电-水EH的水负荷 q_{out} 均为200 m³/h,则输入侧水 流量 q_{in} 相同(202.02 m³/h),从而3种情况下配水网 的水负荷相同,因此配水网的水力计算结果完全相 同(见图A1(c)、(d))。

场景1中3种情况的电水比 α 递增,表明供给增 压泵的电功率在输入电功率 P_{in} 中的占比递增,而 3种情况下的电负荷 P_{out} 相同,因此,随着 α 增大, P_{in} 相应增加,从而接入配电网节点 B_{13} 的负荷增加。由 于3种情况下配电网的其他负荷及节点 B_1 (平衡节 点)的电压相同,因此,随 α 增大,配电网支路 B_8-B_{13} 的潮流明显增加,导致上游支路 B_7-B_8 、 B_2-B_7 及 B_1-B_2 的潮流随之增加,而支路 B_2-B_5 、 B_5-B_6 的潮流则不 变(见图A1(b))。另一方面,由于支路 B_8-B_{13} 、 B_7-B_8 、 B_2-B_7 及 B_1-B_2 的潮流增加,导致平衡节点之外的 各节点电压均有不同程度的下降,且距离节点 B_1 较 远节点(如节点 B_{11} — B_{13})的电压下降趋势更明显。 这是因为节点 B_{11} — B_{13} 的电压同时受支路 B_7-B_8 、 B_2-B_7 潮流的影响,而节点 B_2 、 B_5 和 B_6 的电压仅受 支路 B_1-B_2 潮流的影响。

3.1.2 对场景2的分析

由表3及图A2可见,对于场景2的3种情况, I

型电-水EH的水负荷 q_{out} 分别为100、200、300 m³/h,因此,输入侧水流量 q_{in} 相应增加,从而配水网节点 N₃的水负荷随之增加。由于3种场景下配水网其余 节点水负荷、水库(节点 N₁)及蓄水池(节点 N₂)水头相同,随着 q_{out} 增加,各管段流量增加,而节点 N₃—N₇的水头则相应降低(见图A2(c)、(d))。

另一方面,由于3种情况下q_{out}递增,导致 I 型 EH输入侧功率P_{in}小幅增加,因此,随q_{out}增加,受节 点B₁₃负荷影响的各支路潮流小幅增加,从而导致配 电网中非平衡节点的电压小幅下降。

3.1.3 2种场景的对比

由场景设置可见,2种场景下第2种情况的唯一 区别在于 I 型电-水 EH的运行模式。因此,取2种 场景第2种情况的潮流结果如图5所示,以进一步对 比分析 I 型电-水EH的2种运行模式对联合潮流的 影响。图中,a相电压为标幺值。显然,2种模式下, 由于 I 型电-水EH的q_{in}相同,除 I 型电-水EH输出 水头H_{out}不同之外,配水网的水力计算结果完全一 致,因此图5仅对比2种模式下配电网的潮流分布。



图5 配电网潮流结果对比



可见,尽管2种模式下 I 型电-水 EH 的电负荷 P_{out}均为100 kW,由于模式2要求增压泵提供100 m 的扬程,而模式1 对扬程无特殊要求(根据表3结果 可得模式1 的扬程约为53 m),因此模式2需要配电 网提供更多电功率以支撑 EH 的扬程需求。由表3 可见,模式2下的P_{in}=244.7 kW,而模式1下的P_{in}仅 为185.2 kW。因此,与模式1相比,模式2下 I 型 电-水 EH 接入节点(配电网节点 B₁₃)的负荷增大,从 而导致节点 B₁₃的关联支路 B₈-B₁₃以及上游支路 B₇-B₈、B₂-B₇、B₁-B₂的潮流相应增加,而相关节点 B₂、B₇、 B₈、B₁₁—B₁₃的节点电压相应降低。此外,尽管2种 模式下支路 B₂-B₅、B₅-B₆的潮流不变,但由于节点 B₂ 的电压下降,导致节点 B_5 、 B_6 的电压也随之下降。 3.2 **算例**2

算例2由IEEE 123节点配电网与81节点配水 网耦合形成。该算例系统含6个泵站、4个 I型电-水EH(分别运行于2种模式)及5个 II型电-水EH, 接线示意图如附录图A3所示。算例数据见文献 [22]。算例2用于验证本文所提联合潮流方法对较 大规模区域IEWS潮流计算的适应性,并分析水负荷 水压特性对联合潮流分布的影响。

在不计/计及水负荷水压特性2种情况下,对 算例2分别进行基于DDA和PDA的联合潮流计算。 2种分析模式下,配水网各节点水头及水负荷流量 如图6所示。



Fig.6 Hydraulic heads and nodal water loads in Example 2

由图6可见,利用PDA和DDA所得水头(以下简称为"PDA水头"和"DDA水头")有明显差异,除 定压节点(如水库或蓄水池节点N₁、N₃₄、N₈₀等)及个 别节点(如N₁₇、N₂₂(见图6(a)椭圆虚框部分))之外, 绝大部分节点的PDA水头均明显高于DDA水头。 这是因为PDA在水力分析中考虑了水压特性(式 (7)),即水负荷实际流量随水头降低而减小,而 DDA将负荷节点处理为水流量是期望流量的定流 节点。因此,PDA模式下各节点的水负荷流量均小 于或者等于DDA模式(如图6(b)所示),而2种模式 下的水库及蓄水池的水头相同,从而导致PDA水头 普遍高于DDA水头。

以配水网节点 N₅₁为例具体说明如下。由图 6 (a)可知,该节点的 DDA 水头为 32.4 m,而 PDA 水头 为 46.9 m,两者相差 14.5 m(约为 PDA 水头的 30%)。 进一步分析发现,节点 N₅₁的期望负荷流量为 438.02 m³/h(如图 6(b)所示),需求水头为 53.8 m,但该节 点的实际水头仅为 46.9 m,导致其实际流量小于期 望流量, 仅为 392.28 m³ / h。由于 PDA 按实际流量 (392.28 m³ / h)进行水力计算, 而 DDA 按期望流量 (438.02 m³ / h)进行计算, 因此 PDA 水头高于 DDA 水头。节点 N₁₇、N₂₂的 DDA 水头高于 PDA 水头的原 因见下文分析。

2种模式下水泵支路的水力计算结果及消耗的 电功率如附录表A1所示,表中"相对偏差"以PDA结 果为参考值,取值为负表示DDA的计算结果小于 PDA。

由表A1可见,2种模式下水泵支路潮流结果有显著差异,流量和扬程的最大偏差分别超过15%、25%。由于PDA的水负荷流量小于DDA,总体而言,利用PDA所得水泵支路流量小于DDA,而扬程则大于DDA。唯一例外的是水泵支路N₁₉-N₂₂,该支路DDA的流量小于PDA,而DDA扬程大于PDA。这是因为节点N₁₉为水库(定压节点),节点N₂₂与N₁₇之间为阀门(水头损失很小),PDA模式下N₁₇附近多个节点(N₉、N₁₁、N₁₂及N₃₉)的水负荷显著下降,且下降幅度并不一致(见图6(b)),导致2种模式下N₁₁、N₁₅-N₁₆)的水流反向,而其他水泵附近支路均未出现水流反向的现象,因此,仅有水泵支路N₁₉-N₂₂在PDA模式下扬程减少,从而导致节点N₂₂与N₁₇的PDA水头低于DDA水头。

除水力计算的差异之外,表A1表明2种模式下 水泵消耗的电功率也有明显差异,最大相对偏差接 近20%,但由于水泵电功率同时受流量和扬程的影 响,2种模式下的水泵电功率并无确定的变化趋势。 另一方面,2种模式下水泵电功率的变化也会传递 到配电网,但由于水泵功率只会影响配电网接入节 点的负荷,且本文算例中水泵功率在节点负荷功率 中的占比不大,因此2种模式下配电网潮流的变化 较小(2种模式下接入节点a相电压的最大相对偏差 仅为0.2%)。

以上结果表明,水负荷的水压特性对配水网水 力状态有显著影响,对配电网潮流也有一定影响,应 该基于PDA模式对区域IEWS的联合潮流进行计算 和分析。

4 结论

本文提出面向区域供电、供水综合能源服务商的 IEWS 联合潮流模型,用"IEEE 13 节点配电网+7 节点配水网"和"IEEE 123 节点配电网+81 节点配水 网"这2个算例,验证了本文所提联合潮流模型及计算方法的有效性。

本文所提联合潮流模型的特点总结如下:

(1)用2种用户级电-水EH描述区域IEWS终端 用户的综合用能行为以及由此产生的配电网与配水 30

网之间的关联关系;

(2)与现有研究仅考虑泵站耦合不同,本文所提 潮流模型能够同时考虑配网层面的泵站耦合和终端 用户侧电-水EH这2种耦合方式;

(3)考虑水负荷的水压特性,在区域IEWS联合 潮流分析中引入PDA模式。

需要指出的是,本文所提联合潮流模型可进一步推广应用于电-气-水或电-气-热-水IES。此外,本文主要关注IEWS的稳态分析,未来将结合水力动态特性对IEWS的动态特性开展研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
 ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (1):1-7.
- [2] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望
 [J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8.
 SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow:challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):1-8.
- [3] HE C, ZHANG X, LIU T, et al. Coordination of interdependent electricity grid and natural gas network-a review[J]. Current Sustainable / Renewable Energy Reports, 2018, 5(1): 23-36.
- [4] 崔雪,邹晨露,王恒,等.考虑风电消纳的电热联合系统源荷协 调优化调度[J].电力自动化设备,2018,38(7):74-81.
 CUI Xue,ZOU Chenlu,WANG Heng, et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):74-81.
- [5] 潘华,肖雨涵,梁作放,等.基于复杂网络的电-气-热综合能源 系统健壮性分析[J].电力自动化设备,2019,39(8):104-112.
 PAN Hua,XIAO Yuhan,LIANG Zuofang, et al. Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(8):104-112.
- [6] HOU K, XU X, JIA H, et al. A reliability assessment approach for integrated transportation and electrical power systems incorporating electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1):88-100.
- [7] 刘柳,王丹,贾宏杰,等.面向区域综合能源系统的安全域模型
 [J].电力自动化设备,2019,39(8):63-71.
 LIU Liu,WANG Dan,JIA Hongjie, et al. Security region model for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):63-71.
- [8] MAUPIN M, KENNY J, HUTSON S, et al. Estimated use of water in the United States in 2010[R]. Washington, USA: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2014.
- [9]姜珊.水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D].北京:中国水利 水电科学研究院,2017.
 JIANG Shan. Scientific concept of water-energy nexus and coupling simulation[D]. Beijing: China Institute of Water Re-

[10] XIANG X, JIA S. China's water-energy nexus: assessment of

sources and Hydropower Research, 2017.

water-related energy use[J]. Resources Conservation and Recycling, 2019, 144: 32-38.

- [11] LI Xinyi, ZHAO Xia, YANG Lun. Combined power-water flow analysis of regional integrated electricity and water networks
 [C] //2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018: 1-6.
- [12] ZAMZAM A S,DALL'ANESE E,ZHAO C,et al. Optimal waterpower flow problem: formulation and distributed optimal solution[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018,6(1):37-47.
- [13] 宋仕恒,穆云飞,孟宪君,等.面向分布式电源消纳的配电网-配水网经济调度方法[J].电力系统自动化,2019,43(11): 95-103.
 SONG Shiheng, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Joint eco-

nomical dispatch method of power distribution network and water distribution system for distributed generator accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 95-103.

- [14] NAJAFI J,PEIRAVI A,ANVARI-MOGHADDAM A,et al. Resilience improvement planning of power-water distribution systems with multiple microgrids against hurricanes using clean strategies[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 223: 109-126.
- [15] OIKONOMOU K, PARVANIA M. Optimal coordination of water distribution energy flexibility with power systems operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):1101-1110.
- [16] HANSEN C W,DEBS A S. Power-system state estimation using three-phase models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995,10(2):818-824.
- [17] 严煦世,刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 3版. 北京:中国建 筑工业出版社,2014:38-42.
- [18] WALSKI T M, CHASE D V, SAVIC D A, et al. Advanced water distribution modeling and management[M]. Pennsylvania, USA: Bentley Institute Press, 2007: 32-46.
- [19] ROSSMAN L A. EPANET 2 users manual[EB / OL]. (2017-01-19) [2019-12-01]. https://www.epa.gov/water-research/ epanet#tab-1.
- [20] GOREV N B. Noniterative implementation of pressuredependent demands using the hydraulic analysis engine of EPANET 2[J]. Water Resources Management, 2013, 27 (10): 3623-3630.
- [21] MASSRUR H R, NIKNAM T, AGHAEI J, et al. Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity-gas-heat energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018,9(4):1565-1577.
- [22] HU Xiaoyun. Data for IEWS[DB/OL]. (2019-10-03)[2019-12-01]. https://www.researchgate.net/publication/336797467_ Datas_for_IEWS.

作者简介:



赵 霞(1975—),女,四川广元人,副 教授,博士,主要研究方向为综合能源系统 优化运行与风险评估(E-mail:zx@cqu.edu. cn);

孙名轶(1997—),男,江西南昌人,硕 士研究生,主要研究方向为综合能源系统优 化运行(E-mail::13767974294@163.com)。

赵霞

(下转第41页 continued on page 41)

(编辑 李玮)

Multi-objective optimization configuration for combined heat and power

microgrid system based on improved radar chart model

ZHAO Jianyong^{1,2}, NIAN Heng^{1,2}, MA Runsheng³, SONG Xiaotong³,

SHI Shengchao³, FAN Caixiong³, PANG Bo^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems, Hangzhou 310027, China;

3. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810008, China)

Abstract: In order to solve the size configuration problem of the combined heat and power microgrid system, a multi-objective optimization configuration approach is developed on the basis of improved radar chart model. Firstly, a typical microgrid structure is established, which consists of photovoltaic thermal element, inverter, battery, heat pump, boiler, heat storage and load. Five optimization objectives are selected to comprehensively represent power supply reliability, heat supply reliability, economy and renewable energy usage of microgrid system. Then, a multi-objective improved radar chart model is built, and a fitness function is designed on the basis of the sector area and perimeter. Several constraints are subsequently given to ensure reliable power and heat supply. In this way, an optimal configuration model aiming at maximizing the value of fitness function is built. Through the optimization implementation process, the optimal configuration result is obtained. Finally, numerical results of a realistic case in Qinghai province validate the feasibility of the proposed multi-objective optimization configuration method.

Key words: radar chart model; combined heat and power microgrid system; multi-objective opitimization configuration; fitness function

(上接第30页 continued from page 30)

Combined load flow of integrated electricity-water system for regional multi-energy service

ZHAO Xia, SUN Mingyi, LI Xinyi, HU Xiaoyun

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Most existing researches on the load flow analysis of integrated energy system focus on the multienergy system composed of power, heat and natural gas system. There are only a few researches on the load flow of IEWS (Integrated Electricity-Water System), which, however, suffer from the problems of single coupling mode and poor adaptability. To address these problems, the load flow model and its calculation method for a regional IEWS composed of a power distribution network and a water distribution network are proposed to provide an analysis tool for the regional integrated electricity-water service providers. Firstly, two user-level electricity-water energy hub models are established to describe the electricity-water relationship of integrated energy consumption behaviors of terminal users. On this basis, the approach to calculate the regional integrated electricity-water load flow is proposed. In this model, different couplings between electricity and water(i.e. the couplings through pump station and user-level energy hubs), and the pressuredemand relationship of water loads are taken into account. The proposed method is verified by two regional IEWS test cases that have different scales. The impacts of user-level electricity-water energy hubs and the pressure-demand characteristics of water loads on the load flow distribution are compared and discussed.

Key words:integrated energy system; integrated electricity-water system; power distribution network; water distribution network; load flow; electricity-water energy hub; pressure-driven analysis 附 录



图 A1 场景 1 的潮流结果 Fig.A1 Load flow of Scenario 1



Fig.A2 Load flow of Scenario 2



图 A3 IEWS 算例 2 接线示意图 Fig.A3 Schematic diagram of IEWS Example 2

表 A1	水泵支路潮流结果
Table A1 Lo	ad flows of water pumps

水石	借由	DDA			PDA			相对偏差/%					
大永支路	供电 节点	流量/ (m ³ h ⁻¹)	扬程/ m	电功 率/kW	a 相电 压/p.u.	流量/ (m ³ h ⁻¹)	扬程/ m	电功 率/kW	a 相电 压/p.u.	流量	扬程	电功 率	a 相 电压
N1-N20	B47	3161.48	24.63	235.52	0.976	2904.75	33.25	292.13	0.974	8.8	-25.9	-19.4	0.2
N34-N23	B48	2703.81	39.50	323.04	0.976	2506.88	45.18	342.58	0.974	7.9	-12.6	-5.7	0.2
N19-N55	B76	2079.29	56.05	352.51	1.038	1903.54	59.93	345.05	1.037	9.2	-6.5	2.2	0.1
N21-N49	B13	2808.62	36.30	308.38	1.010	2495.17	45.51	343.47	1.009	12.6	-20.2	-10.2	0.1
N80-N81	B18	1756.21	62.91	334.18	0.992	1626.23	65.35	321.45	0.991	8.0	-3.7	4.0	0.1
N19-N22	B35	2109.11	55.36	353.16	0.986	2493.54	45.55	343.55	0.985	-15.4	21.5	2.8	0.1