

[分布式微网]

含电热负荷的分布式微电网协同调控技术

文/杨琛 陈伟
国网清徐县供电公司

含电热负荷的分布式微网是能源互联网的重要组成部分，不仅可以实现可再生能源的就地消纳，还可以利用热电耦合实现有序用能，提升能源互联网的稳定可靠性。构建含电热负荷的微电网模型，提出一种改进的热电耦合联调控制策略，该策略可实现波动性负荷投入运行时交流微电网的电压及频率稳定。

在能源互联网中，电能与热能的耦合度最大^[1-3]，电热设备作为电力系统中的重要终端负荷设备，经过有效合理利用不仅可缓解新能源高比例接入对电网的电压、频率及功率冲击，还可以促进分布式微电网的新能源消纳^[4-6]。然而目前基于电负荷及热负荷耦合的协同调控技术研究较少^[7-10]。基于此，本文提出一种电热耦合的分布式微电网协同调控技术，将电加热负荷作为柔性可调负荷响应分布

式微电网需求，设计含调频功能的整流器控制进行供电，保障分布式微网交流侧突增波动性负荷时电网的频率、功率及电压稳定，从而保障电网的安全稳定可靠运行。

微电网模型构建

本文构建的分布式微电网模型如图1所示。其中源侧包括外部电网及分布式新能源的光储系统；荷侧

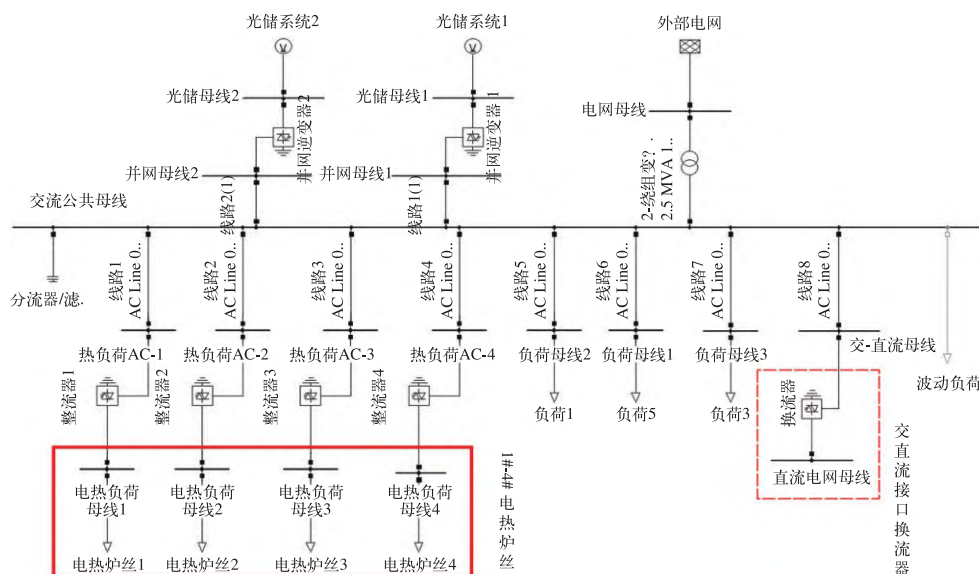


图1 含电热负荷的分布式微电网DigSILENT模型

荷,在整流器电压控制器中引入交流侧频率调节附加信号,来调节交流电网频率。控制结构如图2所示。

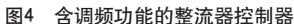
其中, 整流器结构如图3所示, PWM整流器设计为 V_{dc} -Q控制, 即控制直流侧电压与交流侧无功功率, 直流侧电压给定值通过交流侧频率偏差进行修正, 无功功率设置为0, 即正常运行时, PWM变换器与外部交流电网之间没有无功功率流动, 整流器的功率因数近似为1。

交流侧电压幅值稳定与频率稳定对交直流微电网的安全运行十分重要, 为提高交流微电网频率稳定性, 可以将电热负荷看做功率可调的柔性负



图3中, e_a 、 e_b 、 e_c 为交流电网三相对称电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为交流电网三相对称电流; v_a 、 v_b 、 v_c 为变换器交流侧三相电压; R 、 L 分别为交流侧线路电阻和电感; C 为直流侧滤波电容; v_{dc} 为直流侧母线电压。

在PWM整流器控制中,采用电压外环、电流内环的双闭环控制策略,改进的含调频功能的整流器控制策略如图4所示。



为了实现解耦控制，通常将控制变量从三相静止 abc 坐标系经Clark变换与Park变换转换至两相旋转 dq 坐标系，在 dq 坐标系的数学模型为

$$\begin{cases} u_{sd} = -L \frac{di_{sd}}{dt} - Ri_{sd} + \omega Li_{sq} + e_d \\ u_{sq} = -L \frac{di_{sq}}{dt} - Ri_{sq} - \omega Li_{sd} + e_q \end{cases} \quad (1)$$

式中， u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为交流侧相电压、相电流的 d 轴分量和 q 轴分量； e_d 、 e_q 分别为电网三相电动势的 d 轴分量和 q 轴分量。

由式(1)可以看出，交流侧电流 i_{sd} 、 i_{sq} 与三项内容相关：交流侧电压 u_{sd} 、 u_{sq} ，耦合项 ωLi_{sq} 、 ωLi_{sd} 和电网电动势 e_d 、 e_q 。利用PI控制与解耦控制得到控制方程

$$\begin{cases} u_{sd} = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_{sd}^* - i_{sd}) + \omega Li_{sq} + e_d \\ u_{sq} = -(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_{sq}^* - i_{sq}) - \omega Li_{sd} + e_q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R + K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}}{L} & 0 \\ 0 & \frac{R + K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}}{L} \\ \frac{K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， K_{ip} 和 K_{il} 分别为电流内环PI控制器的比例系数和积分系数； i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 分别为电压外环PI控制器得到的交流侧相电流的 d 轴和 q 轴分量指令的参考值，通过 dq 解耦实现 i_{sd} 、 i_{sq} 的独立控制。

实例分析及结果

设置在交流侧突然投入0.2 MW的波动性负荷，观察基于改进控制策略下交流微电网的频率、整流器功率及电压波形，结果如图5所示。

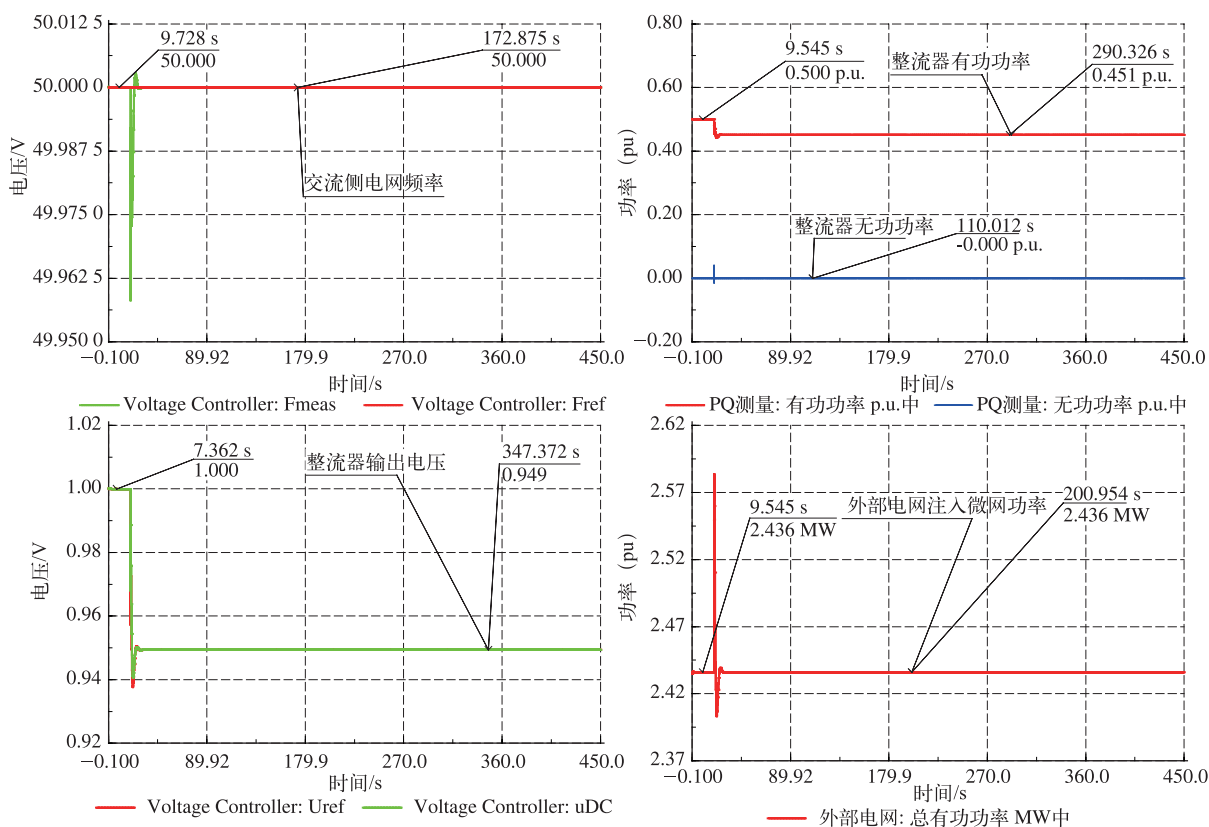


图5 波动负荷投入运行电网侧变量波形

图5显示，当交流侧波动负荷投入运行时，交流侧频率降低，此时电负荷整流器会通过频率调节作用降低电负荷工作电压到0.95 p.u.，使电负荷功率由0.5 MW降低至0.45 MW，从而使交流侧负荷减

小，频率逐渐恢复至50 Hz。结果表明所提出的改进控制策略可良好地实现波动性负荷投入运行时交流微电网的电压及频率稳定。

结束语

本文构建了含电热负荷的分布式微电网模型，提出一种改进热电耦合协同调控策略，通过含调频功能的整流控制器实现热负荷对分布式微电网的平滑调控。该控制策略良好地解决波动负荷突增时分布式微电网的频率、功率及电压波动问题。该方法的优势是：①减少了额外的波动平抑设备投资，只依靠分布式微电网内电热负荷的耦合调控实现电网的稳定运行；②效果显著，经改进控制后的频率、电压、功率波形基本稳定，响应速度较快；③实现分布式微电网中电与热的耦合，为进一步研究能源互联网多能互补提供技术支撑。EA

(收稿日期：2024-03-06)

参考文献

- [1] 董亮, 黄励, 刘万根, 等. 电-热综合能源系统多目标优化[J]. 电气自动化, 2023, 45 (4): 54-56.
- [2] 黄文焘, 王萧博, 邵能灵, 等. 电热微网能量耦合转换模型与梯级优化利用方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (21): 6804-6815.
- [3] 龚思丞, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于复杂网络

的电热微网拓扑综合评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (23): 173-184.

- [4] 吕航, 吴琼, 王浩婷, 等. 考虑不确定性的电热耦合多能微网系统概率潮流计算[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39 (2): 167-174.
- [5] 宗昌盛, 吴帅, 张家豪, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 沈阳工程学院学报, 2023, 19 (2): 57-62.
- [6] 何勇萍, 刘小敏, 肖艳利, 等. 电热耦合综合能源系统双阶段多目标规划研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32 (1): 27-33.
- [7] 丁国栋. 计及电热时序耦合特性的电热联合系统源荷协同调度[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [8] 戴世刚. 电热联合微网协调消纳与梯级优化策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [9] 邱涛, 巩志皓, 张昊, 等. 计及可再生能源消纳的电热综合能源系统多目标优化模型[J]. 电力大数据, 2023, 26 (5): 18-24.
- [10] 丁煜蓉, 陈红坤, 吴军, 等. 计及综合能效的电-气-热综合能源系统多目标优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (2): 64-73.

