

智能微电网运行策略研究

胡大佩

长园飞轮物联网技术（杭州）有限公司 浙江 杭州 311121

摘要：智能微电网以其高度自治性、自愈能力、灵活性和智能化水平，成为现代能源体系的重要组成部分。本文探讨了智能微电网的特点、运行模式及其运行策略。通过多目标优化、大数据分析等方法，智能微电网能够实现能源的高效利用与灵活调度，提升可再生能源的消纳能力，减少对化石能源的依赖，降低整体能源消耗和碳排放。本文还详细分析了有功、无功功率计算在微电网运行中的重要性，为智能微电网的稳定运行提供了理论依据和技术支持。

关键词：智能微电网的特点；运行；切换运行策略

随着全球能源结构的转型和环保意识的提高，智能微电网作为一种集成式、分布式能源系统，逐渐成为现代能源体系的重要组成部分，智能微电网通过先进的信息技术实现能源的高效、清洁和智能管理，具备自我调节和自我保护能力。本文将深入探讨智能微电网的特点、运行模式及其运行策略，旨在为智能微电网的发展和应用提供理论依据和技术支持。

1 智能微电网的特点

智能微电网以其高度的自治性和自愈能力、良好的灵活性和可扩展性，以及不断提升的智能化和自动化水平，区别于传统电网，成为现代能源体系中的重要组成部分。在主电网遭遇故障或面临不可预见的能源供应中断时，智能微电网能够迅速启动自主运行模式，通过内部能源资源的智能重新分配与优化调度，确保关键负荷的持续供电，实现自我恢复与稳定运行，这一特性极大地增强了电力系统的韧性和可靠性；而且它能够无缝集成太阳能、风能、生物质能等多种类型的分布式能源，以及电池储能、超级电容器等先进的储能设备，根据实际需求灵活调整系统配置，实现能源的高效利用与灵活调度，通过精细化的能源管理和优化调度策略，显著提升可再生能源的消纳能力，降低对化石能源的依赖，进而降低整体能源消耗和碳排放；借助先进的通信技术和信息技术，智能微电网能够实现对系统状态的实时监测、能源需求的精准预测以及运行策略的自动调整，极大地提高了系统的响应速度和决策效率；

2 智能微电网的运行模式

2.1 并网运行模式

并网运行模式下，智能微电网与主电网紧密相连，实现了电力资源的共享与优化配置，显著提升了系统的供电可靠性。在此模式下，智能微电网能够充分利用主电网的稳定性和备用容量，在自身发电能力不足或遭

遇突发状况时，依然能够为用户提供稳定可靠的电力供应，确保供电的连续性和稳定性。同时智能微电网作为独立单元积极参与电力市场交易，通过灵活买卖电力实现经济效益的最大化，这种市场参与机制不仅促进了电力资源的优化配置和高效利用，还激发了微电网运营主体的积极性与创造性。更为突出的是，智能微电网还能电网提供调频、调压等辅助服务，有效提升了整个电网的运行效率和稳定性，增强了电网应对复杂工况和突发事件的能力。在能量流动方面，并网运行模式下的智能微电网与主电网之间形成了双向互动机制，当微电网内部发电功率超过负荷需求时，多余的电力可顺畅输送到主电网，实现电力的余缺调剂；而当微电网内部发电功率不足时，则能迅速从主电网获取电力补充，这种双向能量流动机制不仅有助于电网的负荷平衡，还促进了能源的优化配置和高效利用，显著降低了能源浪费和损耗，为构建清洁、低碳、安全、高效的现代能源体系提供了有力支撑^[1]。

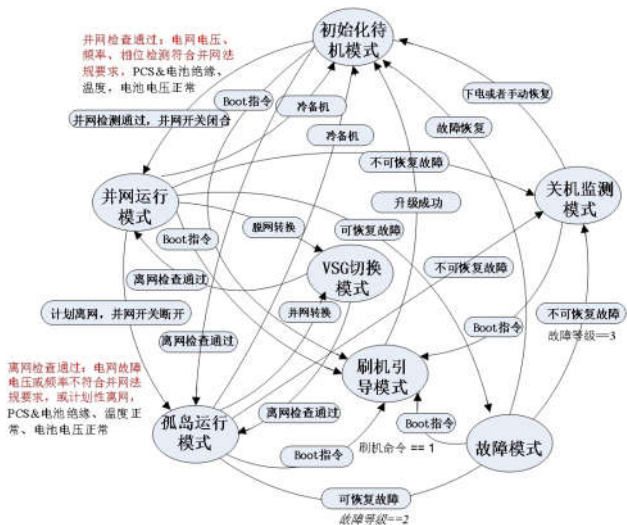


图1 智能微电网运行逻辑切换图

2.2 孤岛运行模式

孤岛运行是智能微电网在特定情境下展现其高度自主性与可靠性的重要运行模式，当主电网遭遇故障或停电时，智能微电网能迅速切换至独立运行状态，凭借自身具备的储能能力和发电能力，有效应对可再生能源发电的波动性与间歇性，确保关键负荷获得持续、稳定的电力保障。在此模式下，智能微电网的能量管理策略尤为关键，由于完全依赖自身发电和储能资源，必须精确预测可再生能源发电量、负荷需求以及储能系统实时状态，以制定合理高效的能量调度计划，这就要求其具备先进的预测技术和数据分析能力，能够准确评估各种不确定因素对能源供需平衡的影响，并提前做出相应调整与优化。而智能能量管理系统在孤岛运行模式中发挥着核心作用，它集成先进的传感器、通信技术和优化算法，实时收集分析微电网内的发电量、负荷需求、储能状态等运行数据，并据此动态调整能量调度策略。该系统还具备强大的自适应能力和学习机制，能不断根据微电网实际运行情况和外部环境变化优化能量管理策略，提升运行效率和可靠性；

2.3 其它运行模式

除并网运行模式和孤岛运行模式外，还包含平缓切换模式（VSG虚拟同步发电机切换模式）、刷机引导模式（程序更新模式）、故障模式、关机监视模式、初始化待机模式等，各运行模式相互间的切换逻辑。

3 智能微电网的切换运行策略

3.1 主要脱网、并网策略

智能微电网在运行过程中，主要脱网、并网策略的合理运用对于保障其稳定、高效运行至关重要。当主电网出现故障或进行计划性停电时，智能微电网需要迅速且平稳地脱离主电网，切换至孤岛运行模式。这一脱网策略的关键在于能够快速且精准地检测到主电网的故障情况，并在第一时间切断与主电网的连接。这就要求微电网配备先进的故障检测装置，能够实时、敏锐地捕捉主电网的异常信号，同时拥有快速响应的断路器设备，确保在检测到故障后能迅速动作，实现微电网与主电网的可靠分离。在脱网的瞬间，微电网面临着内部电力供应的重新调整挑战，需要依据内部储能系统的剩余电量、当前负荷需求以及可再生能源的实时发电功率等多方面因素，迅速调整能量管理策略，通过合理分配储能系统的输出、优化可再生能源的利用方式等，确保关键负荷能够得到持续、稳定的电力供应，保障重要设备和系统的正常运行。而在具备并网条件时，智能微电网则需安全、稳定地接入主电网，以实现电力资源的共享与

优化配置。并网策略的核心在于解决微电网与主电网之间的电压、频率和相位匹配问题。借助先进的同步装置和精确的控制算法，能够确保微电网在并网瞬间与主电网的电气参数完全一致，从而避免并网过程中可能出现的冲击，保障电网的安全稳定运行。并网后，智能微电网可以充分发挥其灵活性优势，积极参与电力市场交易。根据电价信号灵活调整自身的发电和用电计划，在电价较低时增加购电或储能，在电价较高时释放储能或减少用电，实现经济效益的最大化，而且微电网还可为主电网提供调频、调压等辅助服务，通过自身的调节能力帮助主电网维持稳定地运行状态，提升整个电网的运行效率和稳定性，促进电力资源的优化配置和高效利用。^[3]

3.2 平缓转换策略（VSG切换运行模式）

智能微电网在脱网与并网模式切换时，实现平缓过渡能有效避免对负荷和电网造成冲击，切实保障电力供应的稳定与安全。平缓转换策略的核心聚焦于精确把控能量流动以及电压、频率的变化。在脱网转换阶段，微电网不可骤然切断与主电网的联系，而是应逐步减少和主电网之间的功率交换，同时迅速且合理地增加内部发电和储能系统的输出功率。具体而言，需根据负荷的实时需求，精准调节分布式电源，像太阳能光伏板、风力发电机等的发电功率，使其输出达到最佳状态；还要合理调度储能系统，如电池储能装置，让其及时释放电能，填补因减少与主电网功率交换而产生的电力缺口，以此维持负荷的稳定供电，确保重要设备持续运行。而在并网转换过程中，微电网同样不能急于接入主电网，需先缓慢调整自身的电压和频率，使其与主电网的参数逐渐匹配，这一过程要借助先进的测量设备和精确的控制算法，实时监测微电网和主电网的电压、频率差异，并依据监测结果微调微电网的输出，待电压和频率达到合适的匹配范围后，再平稳接入主电网；

3.3 频率稳定、电压稳定控制策略

智能微电网的稳定运行高度依赖频率稳定和电压稳定控制策略的有效执行，这两者均是保障微电网正常运作不可或缺的关键要素。频率稳定作为智能微电网稳定运行的关键指标之一，在微电网中，分布式电源输出功率的波动以及负荷变化等因素极易引发频率波动。为保持频率稳定，可采用基于下垂控制的频率调节方法，分布式电源会依据自身下垂特性自动调整输出功率以响应频率变化，当频率下降时增加输出功率，当频率上升时减少输出功率。同时，储能系统作为频率调节的重要辅助手段，在频率偏差较大时能快速充放电以平衡功率、稳定频率。此外，通过实时监测频率变化并采用先进的

预测控制算法,可提前调整分布式电源和储能系统的运行参数,预防频率大幅波动,确保微电网频率始终在允许范围内稳定运行。电压稳定同样对微电网正常运行至关重要,分布式电源的接入位置、容量以及负荷分布等因素都会影响微电网的电压水平。为维持电压稳定,一方面可根据微电网电压分布情况合理配置无功补偿装置,如静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等,实时补偿无功功率、调节电压;另一方面,分布式电源如光伏逆变器、风力发电机等具备一定无功调节能力,可通过控制其无功输出参与电压调节。利用先进的电压控制算法,根据实时监测的电压数据动态调整无功补偿装置和分布式电源的无功输出,确保微电网各节点电压保持在合理范围内,进而保障设备和用户的用电安全,推动智能微电网高效、稳定运行^[4]。

3.4 关联的有功、无功等计算

(1)有功功率计算。通过实时精准监测发电设备的输出功率以及负荷的有功需求,能够计算出系统的有功功率平衡状况,在计算时要全面考虑发电设备的效率、线路损耗等诸多因素,像太阳能光伏发电系统,光照强度、温度等参数会直接影响其实际输出功率,要依据这些参数准确计算发电功率;风力发电系统则受风速、风

向等参数决定发电功率大小。精确的有功功率计算可优化发电设备的运行计划,合理安排出力,避免能源浪费,显著提高能源利用效率,确保微电网在满足负荷需求的同时实现经济高效运行。(2)无功功率计算。无功功率主要由无功补偿装置和发电设备的无功输出提供,通过计算系统的无功功率需求以及无功补偿装置的容量,能够合理配置无功补偿设备。计算时要充分考虑负荷的功率因数、线路的电抗等因素,对于感性负荷,因其自身功率因数较低、无功损耗较大,需配置相应的容性无功补偿装置以提高功率因数、减少无功损耗。同时精确的无功功率计算还能优化无功补偿装置的运行策略,根据系统实时需求动态调整无功补偿量,有效提高电压稳定性,保障微电网中各电气设备的正常运行,为微电网的安全稳定运行提供有力支撑。^[2]

3.5 智能微电网控制策略实验验证与结果分析

为验证基于t时段电价在负荷和储能可控场景下的智能电网系统优化算法来求取电网电费最省的有效性,进行了一个电价峰值、两个电价峰值的实验,重点是并网条件下智能微电网对储能充放电控制以及可调负荷的控制策略算法。

3.5.1 实验设置

表1 实验对象常量及决策量定义

常量			光伏板功率温度系数	μ	
储能容量	$E_{\max}$		工作点光伏板温度	F_C	
储能额定功率	$P_{es,\max}$		光伏板标准工作温度	F_{STC}	
储能最小充放点功率	$P_{es,\min}$		决策变量		
储能充电效率	η_{ch}		t时段电网交互功率值	$D_{actual,t}$	
储能放电效率	η_{disch}		t时段储能充电功率	$P_{disch,t}$	$t = 0,1,2,\dots$
储能最高荷电状态	$SOC_{\max}$		t时段储能放电功率	$P_{ch,t}$	$t = 0,1,2,\dots$
储能最低荷电状态	$SOC_{\min}$		t时段储能充电状态	$\alpha_t = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
t时段原始负荷功率	$P_{load,t}$	$t = 0,1,2,\dots$	t时段储能开启充电状态	$\alpha_t^v = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
t时段光伏功率	$P_{pv,t}$	$t = 0,1,2,\dots$	t时段储能停止充电状态	$\alpha_t^w = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
储能连续充电时间	T_c	$t = 0,1,2,\dots$	t时段储能放电状态	$\beta_t = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
储能连续放电时间	T_d		t时段储能开启放电状态	$\beta_t^v = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
t时段电价	λ_t	$t = 0,1,2,\dots$	t时段储能停止放电状态	$\beta_t^w = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
各时段时间值	Δt		t时段储能保持状态	$\theta_t = 0 \text{ 或 } 1$	$t = 0,1,2,\dots$
标准条件光伏额定功率	P_{STC}		t时段实际负载功率	$P_{load,t}$	$t = 0,1,2,\dots$
工作点辐射强度	G_c		t时段储能电量	$E_{es,t}$	$t = 0,1,2,\dots$
标准辐射强度	G_{STC}		t+1时段储能电量	$E_{es,t+1}$	$t = 0,1,2,\dots$

实验目标方法及约束条件:

目标方法函数,总购电费用最少:

$$\text{Min} \left(\sum_{t=1}^T (\lambda_t * D_{actual,t}) \right) \quad (1)$$

约束条件1:任意时刻 $\forall t$:

$$D_{actual,t} + P_{pv,t} = P_{load,t} + P_{ch,t} - P_{disch,t} \quad (2)$$

$$P_{pv,t} = P_{STC} * \frac{G_c}{G_{STC}} - [1 + \mu(F_c - F_{STC})] \quad (3)$$

$$\alpha_t + \beta_t + \theta_t = 1 \quad (4)$$

$$\alpha_t * P_{es,min} \leq P_{ch,t} \leq \alpha_t * P_{es,max} \tag{5}$$

$$\beta_t * P_{es,min} \leq P_{ch,t} \leq \beta_t * P_{es,max} \tag{6}$$

$$E_{es,t+1} = E_{es,t} + \eta_{ch} * P_{ch,t} * \Delta t - \frac{P_{disch,t} * \Delta t}{\eta_{disch}} \tag{7}$$

$$SOC_{min} \leq \frac{E_{es,t}}{E_{max}} \leq SOC_{max} \tag{8}$$

约束条件2：回到初始状态，不影响第二天运行（每15分钟1个点，全天96个）

$$E_{es,96} = E_{es,1} \tag{9}$$

约束条件3：储能最小充电时间，初始阶段，假设初始阶段，储能装置没有充电或放电：

$$\sum_{k=t-Tc}^t \alpha_k^v \leq \alpha_t \quad \forall t > Tc \tag{10}$$

$$\sum_{k=t-Tc}^t \alpha_k^o \leq \alpha_t \quad \forall t > Tc \tag{11}$$

$$\alpha_t - \alpha_{t-1} = \alpha_t^v - \alpha_t^o \quad \forall t \geq 1 \tag{12}$$

约束条件4：储能最小放电时间：

$$\sum_{k=t-Tc}^t \beta_k \leq \beta_t \quad \forall t > Tc \tag{13}$$

$$\sum_{k=t-Tc}^t \beta_k^o \leq 1 - \beta_t \quad \forall t > Tc \tag{14}$$

$$\beta_t - \beta_{t-1} = \beta_t^v - \beta_t^o \quad \forall t \geq 1 \tag{15}$$

3.5.2 实验数据仿真结果（如图2、图3）

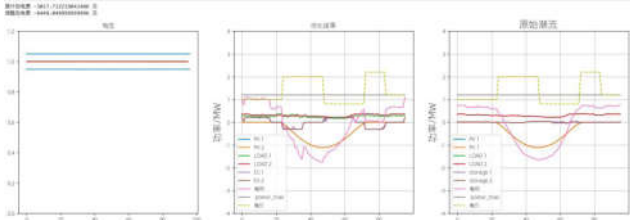


图2 单峰电价智能微网调控策略仿真输出结果

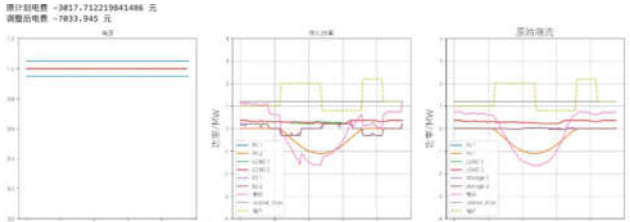


图3 双峰电价智能微网调控策略仿真输出结果

3.5.3 实验结论

表2 仿真输出结果汇总对比

假设条件	控制策略	光伏	储能	可调负荷	电费降低效果
单峰电价	无	有	有	有	3017.71
单峰电价	智能微网调控策略	有	有	有	8449.05
双峰电价	无	有	有	有	3017.71
双峰电价	智能微网调控策略	有	有	有	7033.95

仿真输出结果汇总如表2所示，智能微网调控策略的系统电费降低效果比较明显，有很高的推广价值。

结语

综上所述，智能微电网的运行策略研究对于推动能源转型、提高能源利用效率具有重要意义。通过合理的脱网、并网策略，平缓转换策略，以及频率和电压稳定控制策略，智能微电网能够更好地适应市场变化和用户需求，实现清洁、低碳、可持续的能源发展。未来，随着技术的不断进步和市场环境的优化，智能微电网将在电力系统中发挥更加重要的作用。

参考文献

[1]贾景姿,曾鸣.微电网智能运行策略研究[J].上海电气技术,2023,16(4):1-5,17.
[2]牛义波,崔海强.智能电网环境下的微电网能源管理策略研究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(11):115-117,121.
[3]仇佳鑫,查翔,李妍.微电网并网运行与孤岛运行模式切换的研究[J].光源与照明,2024(11):189-191.
[4]杜杰.智能微电网的控制策略研究综述[J].化工管理,2022(29):127-130.