

[协调控制]

新型电力系统源-荷-储分布式协调控制及应用研究

文/王曦
南京南瑞继保电气有限公司

为提升新型电力系统运行的稳定性与供电可靠性，提高能源综合节能率与电力系统调度经济性，开展新型电力系统源-荷-储分布式协调控制及应用研究。首先，设计源-荷-储联合响应机制，为分布式协调控制提供协同互动保障。其次，利用经验模态分解原理，提取源-荷-储特征。在此基础上，构建源-荷-储分布式协调控制双层模型，开展分布式协调控制。应用分析结果表明，提出的协调控制方法应用后，电力系统综合节能率均达到80%以上，有效地减少能源消耗量。

电力系统从广义角度上分析，指的是电能生产与消费的系统^[1]。能够将一次能源，经过不断地转化作用，生成电能，再根据各用户的用电需求，合理分配并输送电能^[2]。在电力系统的不断运行中，分布式电源起到至关重要的作用，且应用日益广泛。分布式电源由发电装置与储能装置共同组成，属于一种能够与周边环境兼容的独立电源^[3]。由于电力系统中的负荷资源呈现多元化发展，导致传统的电力系统逐渐向双向复杂的新型电力系统转变。新型电力系统虽然能够有效地促进能源消纳，为能源结构转型提供良好的保障，但是其运行过程中，由于清洁能源自身具有一定的不确定性与随机性，导致电力系统内存在电压波动与网损等问题，效益无法实现最大化。为改善这一问题，合理的新型电力系统源-荷-储分布式协调控制方法至关重要。现阶段，传统的电力系统协调控制方法多数采用文献[4]提出的方法，该方法在实际应用过程中，未能综合考虑分布式发电、柔性负荷与储能系统协同优化调度的特性需求，无法显著提升电力系统运行的稳定性与供电可靠性，降低能源综合节能率与电力系统调度经济性，增加电力系统调度成本^[4]。基于

此，本文开展新型电力系统源-荷-储分布式协调控制及应用研究。

新型电力系统源-荷-储分布式协调控制

1. 设计源-荷-储联合响应机制

在本文设计的新型电力系统分布式协调控制方法中，源-荷-储协调控制的主要目的在于充分利用一切可控资源联合可再生能源，进而实现电力系统良性的多元协同互动目标。其中，源-荷-储联合响应机制起到了重要的保障作用，促进间歇性能源的大范围消纳^[5]。因此，本文首先对新型电力系统的源-荷-储联合响应机制进行设计，如图1所示。

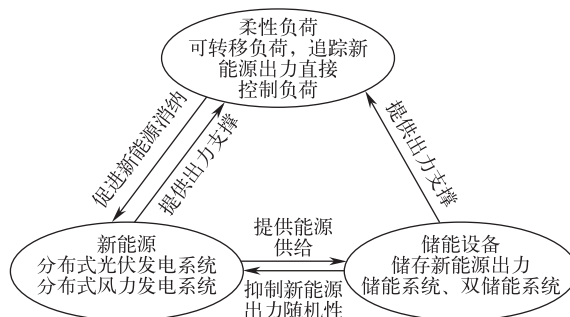


图1 新型电力系统源-荷-储联合响应机制

由图1可知,本文设计的源-荷-储联合响应能够全面促进新型电力系统的新能源消纳。其中,源-荷协调控制能够为新型电力系统的负荷提供出力支撑,柔性负荷起到促进新能源消纳作用;源-储协调控制能够为储能系统提供充足的能量供给,有效抑制新能源出力时产生的波动^[6]。在联合响应机制中,设置新型电力系统的蓄电池始终保留20%的裕度,作为系统运行的备用。基于用户签订的合同,优化ESS日前计划出力,将联合响应计划传输给用户^[7]。设置ESS作为新型电力系统运行的后备力量,根据联合响应计划,实时调整ESS调用计划,生成最终的源-荷-储联合响应机制,为后续分布式协调控制提供协同互动保障。

2. 新型电力系统源-荷-储特征提取

基于上述源-荷-储联合响应机制设计完毕后,为新型电力系统分布式协调控制提供协同互动保障。接下来,根据新型电力系统的运行工况及特征,提取源-荷-储特征。

首先,利用经验模态分解原理,对新型电力系统的无规律频率波进行分解,获取多个频率较为简单的波与残波。对获取到的波与残波进行转换,提取源-荷-储特征。转换及特征提取步骤如下所示。

1) 设定源-荷-储数据序列用 $X(t)$ 表示,提取数据序列的最大值点,拟合处理最大值点的样本差值函数,得出原始新型电力系统源-荷-储数据的上包络线。

2) 提取数据序列的最小值点,拟合处理最小值点的样本差值函数,得出原始新型电力系统源-荷-储数据的下包络线。

3) 设定源-荷-储数据上包络线与下包络线的平均值用 g 表示,从原始新型电力系统源-荷-储数据序列中去掉上、下包络线的平均值,生成一个新的数据序列 $h(t)$,计算式为

$$h(t) = X(t) - g \quad (1)$$

寻找新的数据序列 $h(t)$ 的极值点,若极值点数量大于等于2,则返回步骤1),继续对新型电力系统的波与残波进行分解;若极值点数量小于2,则终止分解,提取源-荷-储信号。从提取到的信号中,获取源-荷-储频谱特征及波动特征。

3. 源-荷-储分布式协调控制

在上述新型电力系统源-荷-储特征提取完毕

后,获取到源-荷-储频谱特征与波动特征。在此基础上,对源-荷-储进行分布式协调控制。首先,构建源-荷-储分布式协调控制双层模型,上层负责协调控制约束分布式电源有功出力与节点电压;下层负责新型电力系统柔性负荷响应约束与总功率守恒约束^[8]。

新型电力系统分布式电源有功出力协调控制公式为

$$P_{DG\min} \leq P_{DG}(t) \leq P_{DG\max} \quad (2)$$

式中, $P_{DG\min}$ 为分布式电源输出有功功率上限; $P_{DG}(t)$ 为分布式电源实际输出的有功功率; $P_{DG\max}$ 为分布式电源输出有功功率下限。

新型电力系统节点电压协调控制计算公式为

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \quad (3)$$

式中, $U_{\min}$ 为新型电力系统节点允许电压的上限; U 为新型电力系统节点的实际电压幅值; $U_{\max}$ 为新型电力系统节点允许电压的下限^[9]。

按照上述协调控制约束公式,对分布式电源有功出力与节点电压进行全方位的协调控制,避免其超出相应的上下限。

新型电力系统柔性负荷响应协调控制计算公式为

$$\sum_{i=1}^T |\lambda_{it}| \leq M_i \quad (4)$$

式中, λ_{it} 为 t 时刻用电用户的响应状态; M_i 为可削减型用电用户的最大响应次数。

综合考虑用户的日常用电约束,对电力系统柔性负荷响应作出协调控制。

新型电力系统总功率守恒协调控制计算公式为

$$P_{Gt} = P_{art} + P_{LA_t} + P_{ESS_t} - P_{DG_t} \quad (5)$$

式中, P_{G_t} 为 t 时刻电力系统配电网从主网的购电量; P_{art} 为 t 时刻电力系统不可控负荷的有功出力; P_{LA_t} 为 t 时刻LA有功出力; P_{ESS_t} 为 t 时刻储能有功出力; P_{DG_t} 为 t 时刻分布式电源有功出力。

综合上述,从多个维度实现新型电力系统源-荷-储分布式协调控制目标,提高电力系统运行的可靠性。

应用分析

上述内容,便是本文提出的新型电力系统源-荷-储分布式协调控制研究的全部流程。在该协调控

制方法投入实际电力系统应用前，需要对该方法的可行性及协调控制效果作出客观验证，确认方法的应用效果能够达到预期要求后，方可投入实际电力系统中应用。基于此，开展如下文所示的分布式协调控制应用分析。

1. 电力系统概况

选取某地区IEEE-33节点电力系统作为此次应用分析的目标。该电力系统运行较稳定，内部构建含有分布式发电的ADN模型。电力系统的建设概况信息见表1。

表1 电力系统建设概况说明

编号	项目	信息
1	节点数量	33
2	联络开关支路/条	5
3	基准电压/kV	12.66
4	三相功率基准值/MV·A	10
5	网络总有功负荷/kV·A	5 084.29

随机从IEEE-33节点配电系统中选取6个节点作为此次研究的对象，节点对应的有功负荷及支路电阻值见表2。

表2 节点有功负荷与支路电阻值

节点编号	支路电阻/Ω	节点负荷/kV·A
01	0.092	100
02	0.426	90
03	0.315	120
04	0.843	60
05	0.724	200
06	1.002	60

通过表2，获取到电力系统节点的有功负荷及对应的支路电阻值。设置电力系统节点步长为15 min，一个调度周期为24 h，总共96个时段，始终控制一个步长中分布式电源与负荷的出力保持相对不变。在此基础上，应用上述本文提出的分布式协调控制方法，开展应用测试分析。

2. 应用结果分析

为了更加客观地验证本文提出的分布式协调控制方法的应用结果，增强应用分析结果的说服力，引入对比分析的方法原理。将上述本文提出的新型电力系统源-荷-储分布式协调控制方法设置为实验组，将文献[2]提出的基于特征融合的协调控制方法设置为对照组1，文献[4]提出的基于安全约束的协调控制方法设置为对照组2。分别对三种方法的分

布式协调控制结果作出对比，进而判断本文提出的方法是否可行。

选取新型电力系统分布式协调控制后的综合节能率作为此次实验的性能评价指标，其计算公式为

$$\delta = \frac{E_a - E_r}{E_a} \times 100\% \quad (6)$$

式中， δ 为新型电力系统综合节能率； E_a 为新型电力系统的能源消耗量； E_r 为该地区电力系统综合能源消耗量。

通过计算，得出此次实验的性能评价指标， δ 越高，说明新型电力系统的能源消耗量越少，源-荷-储分布式协调控制效果越好，反之同理。利用MATLAB模拟分析软件，模拟上述三种协调控制方法的应用全过程，测定并计算协调控制后6个节点对应的综合节能率，获取结果后，作出客观对比，结果如图2所示。

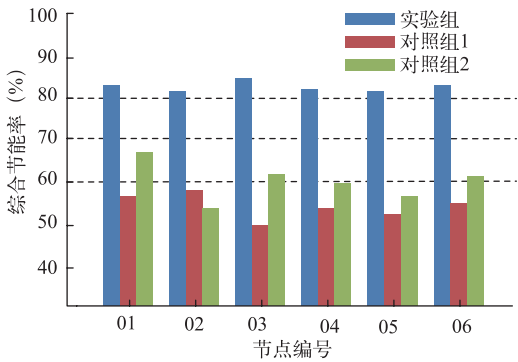


图2 电力系统综合节能率对比结果

通过图2的对比结果可知，三种分布式协调控制方法应用后，表现出不同的性能结果。其中，本文提出的方法应用后，6个节点对应的综合节能率始终高于另外两种方法，均达到80%以上，而对照组1提出的方法应用后，综合节能率最高不超过60%，对照组2提出的方法应用后，综合节能率最高不超过70%。由此对比结果不难看出，本文提出的分布式协调控制方法具有较高的可行性，能够降低电力系统的能源消耗量，提高能源利用效率。

结束语

综上所述，为了优化新型电力系统源-荷-储分布式协调控制效果，减少电力系统能源消耗量。本文开展新型电力系统源-荷-储分布式协调控制方法的全面研究。通过图2的性能评价指标对比结果

可以看出,本文提出的方法应用后,电力系统综合节能率均达到了80%以上,有效地减少了能源消耗量,提高了能源利用效率,充分发挥了新型电力系统的优势与效能,具有重要的研究意义及良好的应用前景。[EA](#)

参考文献

[1] 陈楚靓,李晓露,纪坤华,等.考虑源荷储匹配的配电网集群划分与优化运行[J].电力建设,2023,44(9):80-93.

[2] 杨延栋,舒斐,马金晨,等.基于特征融合的配电网源-荷-储完全分布式协调控制方法[J].电气自动化,2023,45(4):30-32+36.

[3] 侯帅辉,张新燕,代玥,等.计及储能配合与需求侧响应的主动配电网分布式电源规划[J].现代电子技术,2022,45(23):132-137.

[4] 孙丰杰,汲广军,撒奥洋,等.考虑安全约束的

地区电网精益化源网荷柔性互动控制系统[J].山东电力技术,2022,49(10):31-37.

[5] 邓铭,黄际元,吴东琳,等.基于层次分析法的“源-网-荷-储”互动方案汇聚潜力评估[J].供用电,2022,39(9):83-92.

[6] 陈璨,樊小伟,张文浩,等.促进分布式光伏消纳的两阶段源网荷储互动优化运行策略[J].电网技术,2022,46(10):3786-3799.

[7] 贾巍,方兵华,雷才嘉,等.一流城市配电网“源网荷储充”协调优化控制策略[J].机电工程技术,2021,50(6):93-97+203.

[8] 程维杰,颜云松,康明才,等.考虑分布式电源影响的配电网源荷储分层协调控制[J].电力工程技术,2020,39(5):113-119.

[9] 李旭斌,朱永洁,喻琢舟,等.主动配电网“源-荷-储”协调优化控制方法研究[J].机电工程技术,2020,49(5):61-64.

