

# 考虑网源协调发展的四川电网 多适应性规划体系研究

汪荣华

(国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业是国家电网有限公司新的长远发展战略目标。传统经验型的电力系统规划一般将电源与电网规划分割考虑,难以适应能源转型形势下电力行业各主体协同发展。为全面推进电网高质量发展,着力提升电网规划适应性,从经济发展适应性、能源结构适应性、电网结构适应性、网络安全适应性等方面出发,围绕电网多适应性规划原理、多适应性规划指标体系、网源协同多适应性规划方法等关键问题展开深入研究,提出相应的技术模型与解决思路,为提升电网规划效率、促进电源与电网协同发展、更好地服务于社会经济发展提供方案。

**关键词:** 能源转型; 网源协调; 多适应性; 规划体系; 规划方法

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)05-0065-08

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.05.015

## Research on Multi-adaptive Planning System of Sichuan Power Grid Considering Development of Power Grid and Power Source Coordination

Wang Ronghua

(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Building an internationally leading energy Internet enterprise with Chinese characteristics is the new long-term development strategic goal of State Grid Corporation of China. Traditional empirical power system planning generally considers power supply and grid planning separately, and it is difficult to adapt to the coordinated development of power industry under the energy transition situation. To comprehensively promote the high-quality development of power grid and focus on improving the adaptability of power grid planning, starting from the aspects of economic development adaptability, energy structure adaptability, power grid structure adaptability and network security adaptability, an in-depth research on key issues such as adaptive planning index system and grid-source coordination multi-adaptive planning methods is carried out, and the corresponding technical models and solutions are proposed, which can provide a plan for improving the grid planning efficiency, promoting the coordinated development of power source and power grid, and better serving the social and economic development.

**Key words:** energy transition; power grid and power source coordination; multiple adaptability; planning system; planning method

## 0 引言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,是国民经济的战略性资源和基础性事业<sup>[1-2]</sup>。推动能源生产与消费革命,建立清洁环保、高效可靠的能源架构是满足人民日益增长的美好生活需要的

重要支撑。坚强智能电网是承接现代能源体系构建不可或缺的载体,要适应现代能源体系构建,首先需要解决好电网发展的不平衡不充分问题<sup>[3-4]</sup>。

近年来,在习近平总书记关于能源“四个革命、一个合作”战略思想指引下,四川电网快速健康发展,输变电规模、外送能力、清洁能源装机等均在全国名列前茅,成为最大的省级电网,为支撑四川省社

会经济发展起到重要作用<sup>[7-9]</sup>。然而,发展快并不代表质量高,当前四川电网发展不平衡不充分问题仍然较为突出,成为支撑现代能源体系构建的关键制约因素<sup>[5, 6]</sup>。

近年来,电源和电网协调规划逐渐得到专家学者的关注<sup>[8, 10-11]</sup>。文献[12]提出考虑广义灵活性指标体系的输电网规划模型,通过将 Garver-18 节点与实际系统的仿真,表明所提模型具有可行性与实用性。文献[13]提出基于交替方向乘子法的电源与电网协同规划方法,通过 Garver-6 节点对所提方法的有效性进行验证分析。文献[14]提出基于可信性理论的厂网协同规划方法,对比表明新方法具有合理性和经济性。文献[15]提出基于需求响应的源网协调规划模型,算例表明新方法有效性。文献[16]提出基于多层电价响应机制的配电网源网协调方法,使用算例验证所提方法的有效性和可行性。

因此,在建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业的背景下,四川电网作为西南电网的核心组成部分,对清洁能源在全国乃至全球范围内的优化配置将起到重要的枢纽作用。四川电网需在更大范围内寻求跨越式发展,建成全国优质的清洁能源送端枢纽系统,在更大程度上消纳清洁能源,服务绿色发展。四川清洁能源资源体量大、分布聚集、大部分位于边远地区,需要实施集中开发、大规模外送与大范围消纳的规划路线,对电网的资源优化配置能力提出很高要求。此外,随清洁能源、储能装置、电动汽车等新型元件大规模接入电网,未来电力系统的架构与格局将发生重大变化,源荷双向的不确定因素都显著增加。如何准确评估四川主网架在交直流混合、多能融合互补、供需响应互动等新环境下的适应能力,探索相应的评估体系、模型、方法,对建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业将具有重要支撑作用。

## 1 源网协同多适应性规划方法研究

### 1.1 源网协同规划研究

与源网集成统一规划模式不同,所构建的源网协同规划策略基于“厂网分开”的竞争市场环境,充

分研究电源规划中心和电网规划中心的协同与交互,完成分布式自主决策,框架见图1<sup>[13]</sup>。

该分布式协同规划方法具有如下优势:

1) 电网规划中心与电源规划中心分别搭建耦合共享的电网规划模型和电源规划模型,两者在同时满足投资、科技与政策等多适应性约束条件的前提下实现自治决策最优的规划策略;

2) 电网规划中心与电源规划中心两个决策变量之间通过使用少量多次的信息传递(价格信号与共享变量)与迭代计算(规划方案更新与校核),完成电网规划与电源规划的分布式自主决策,协同完成全系统的最优多适应性规划。

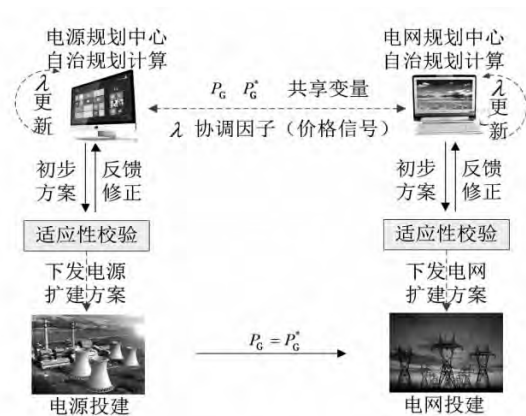


图1 电源与电网协同的多适应规划框架

#### 1.1.1 电源规划子问题

电源规划子问题目标函数为

$$\min \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{i \in \Omega_G} \rho_{G,i,t,s} P_{G,i,t,s} \tau_{i,t} + \sum_{i \in \Omega_{GC}} c_{G,i} Z_{G,i} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{j \in \Omega_W} \rho_{W,j,t,s} P_{W,j,t,s} \tau_{j,t} + \sum_{j \in \Omega_{WC}} c_{W,j} Z_{W,j} \quad (1)$$

式中:  $\rho_{G,i,t,s}$ 、 $P_{G,i,t,s}$ 、 $\rho_{W,j,t,s}$ 、 $P_{W,j,t,s}$  分别为第  $i$  常规发电机、 $j$  风电场在时段  $t$ 、场景  $s$  下的单位出力成本及出力;  $\tau_{i,t}$ 、 $\tau_{j,t}$  为第  $i$  常规发电机、 $j$  风电场在时段  $t$  状态下等效水平年运行时间;  $\Omega_G$ 、 $\Omega_{GC}$  分别为所有常规发电机组集合及待选常规发电机组集合;  $\Omega_W$ 、 $\Omega_{WC}$  分别为所有风电场集合及待选风电场集合;  $S$  为风电出力为基准预测值( $s1$ )、上限值( $s2$ )、下限值( $s3$ )的集合;  $c_{G,i}$ 、 $Z_{G,i}$ 、 $c_{W,j}$ 、 $Z_{W,j}$  分别为常规发电机组  $i$ 、风电场  $j$  的等效年投资成本及二进制投建决策变量。

电源规划子问题需满足的约束条件包括常规发电机出力上下限约束、风电场出力约束、机组爬坡约束、电力平衡约束、负荷正负备用约束、火电燃料消

耗约束、系统污染物排放约束。

### 1.1.2 电网规划子问题

电网规划子问题目标函数为

$$\min \sum_{l \in \Psi_C} c_{L,l} Z_{L,l} \quad (2)$$

式中:  $\Psi_C$  是待选线路合集;  $Z_{L,l}$ 、 $c_{L,l}$  分别是二进制投资建设决定参量和线路  $l$  的年均投资建设成本。

电网规划子问题约束条件包括节点功率平衡约束、线路输送功率约束、潮流方程约束、 $N-1$  安全约束、基态 ( $N-1$  状态) 关联约束。

### 1.1.3 源网协同规划求解算法

采用交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 求解此优化模型。ADMM 将多规模全局优化难题分割成几个小规模的子问题, 使用子问题的多功能通信计算求得全局难题的最优解。因为 ADMM 方法可以保存决策主体的数据私密性且能明显减小计算复杂度, 可用于电网规划和电源规划的分布式自治性决定与互动式协同运算<sup>[2]</sup>。

考虑 ADMM 策略耦合共享变量的电源规划子问题目标函数为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{i \in \Omega_G} \rho_{G,i,t,s} P_{G,i,t,s} \tau_{i,t} + \sum_{i \in \Omega_{GC}} c_{G,i} Z_{G,i} + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{j \in \Omega_W} \rho_{W,j,t,s} P_{W,j,t,s} \tau_{j,t} + \sum_{j \in \Omega_{WC}} c_{W,j} Z_{W,j} + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{i \in \Omega_G} \left[ \lambda_{G,i,t,s}^k (P_{G,i,t,s} - P_{G,i,t,s}^{*k}) + \frac{\omega}{2} \| P_{G,i,t,s} - P_{G,i,t,s}^{*k} \|_2^2 \right] + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{j \in \Omega_W} \left[ \lambda_{W,j,t,s}^k (P_{W,j,t,s} - P_{W,j,t,s}^{*k}) + \frac{\omega}{2} \| P_{W,j,t,s} - P_{W,j,t,s}^{*k} \|_2^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

基于 ADMM 算法耦合共享变量的电网规划子问题目标函数为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{l \in \Psi_C} c_{L,l} Z_{L,l} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{i \in \Omega_G} \\ & \left[ \lambda_{G,i,t,s}^k (P_{G,i,t,s}^k - P_{G,i,t,s}^{*k}) + \frac{\omega}{2} \| P_{G,i,t,s}^k - P_{G,i,t,s}^{*k} \|_2^2 \right] + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{j \in \Omega_W} \left[ \lambda_{W,j,t,s}^k (P_{W,j,t,s}^k - P_{W,j,t,s}^{*k}) + \frac{\omega}{2} \| P_{W,j,t,s}^k - P_{W,j,t,s}^{*k} \|_2^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

考虑 ADMM 策略的电网与电源分布式协同规划计算流程如下:

1) 初始化, 令迭代次数  $k=1$ , 设定原始残差最大值为  $\varepsilon_{\text{pri}}$ 、对偶残差最大值为  $\varepsilon_{\text{dual}}$ 、惩罚因子为  $\omega$ , 令共享参量  $P_{G,i,t,s}^0$ 、 $P_{W,j,t,s}^0$  和乘子系数  $\lambda$  的初值。

2) 计算式 (3) 含有耦合共享变量的电源规划子问题, 得出满足电源规划约束的最优机组出力

$P_{G,i,t,s}^{k+1}$ 、 $P_{W,j,t,s}^{k+1}$  并传输至电网规划子课题。

3) 由电源规划核心传输的共享参量运算含有耦合共享变量的电网规划子问题式 (4), 回传共享参量  $P_{G,i,t,s}^{*k+1}$ 、 $P_{W,j,t,s}^{*k+1}$  至电源规划子问题。

4) 按式 (5)、式 (6) 更新乘子系数  $\lambda$ :

$$\lambda_{G,i,t,s}^{k+1} = \lambda_{G,i,t,s}^k + \omega (P_{G,i,t,s}^{k+1} - P_{G,i,t,s}^{*k+1}) \quad (5)$$

$$\lambda_{W,j,t,s}^{k+1} = \lambda_{W,j,t,s}^k + \omega (P_{W,j,t,s}^{k+1} - P_{W,j,t,s}^{*k+1}) \quad (6)$$

5) 根据式 (5)、式 (6) 识别收敛性, 如果成功完成收敛性判据, 那么停止运算输出结果; 如果未能成功完成收敛性判据, 那么令  $k=k+1$ , 并跳转到步骤 2 开始新一次的分布式自治决策优化运算。

## 2 四川电网多适应规划体系的构建

### 2.1 多适应性评价指标体系框架

所搭建的四川电网多适应性规划评价指标体系由能源结构适应性、经济发展适应性、网架安全适应性、电网结构适应性、可靠性适应性、故障恢复适应性等 6 个一级评价指标构成, 如图 2 所示。

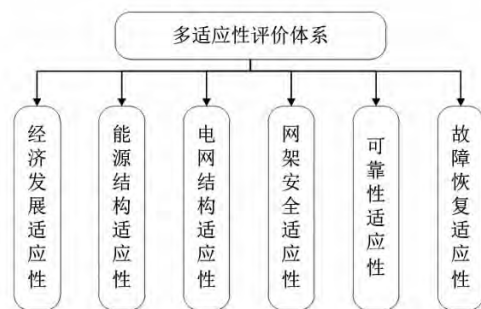


图 2 电网规划多适应性评价体系涉及的层面

### 2.2 评价指标体系层次化结构

#### 2.2.1 经济发展适应性指标体系

1980—2020 年中国 GDP 增长趋势和用电量增长变化趋势大体持平。此外, 电力负载的增大对大电网建设投资的容量有明显的影响。所以, 提出与经济发展相适应的评价指标, 包括电力生产弹性系数、电力平衡系数、容载增速比、容载比、网络损耗、平均功率因数和经济损失指标。

#### 2.2.2 能源结构适应性指标体系

能源结构适应性评价体系大体是由能源的合理开发大小和完成能源的优化匹配来实现评价指标的建立。综合研究水力、煤炭、核能、可再生清洁能源

的能源结构和效能,评估以后电网的输送效能和多种能源结构的适应程度。由此提出能源结构适应性的二级评价指标有新能源接纳能力、清洁能源占比和清洁能源跨区消纳占比。

### 2.2.3 电网结构适应性指标体系

电网结构适应性分为负荷和电源、电网内部各个电压等级之间、电源和电网共3个层面的协同发展。其中,电源和电网结构两者之间的适应性体现是某种电网结构可以符合电能送出与电源接入;电网各个电压等级之间的适应性表现在各种电压等级之间的协同适应,各种电压等级的变电效率互相配合;电网结构和负荷适应性的表征为电网最大能力地为用户提供可靠电能,且可以适合负载在不同时期的波动。具体的表现形式包含直流配套线路供电能力比适应度、线机比、变机比、各电压等级供电效能比适应度、水电通道供电能力配比、多馈入短路比等6个二级指标。

### 2.2.4 网架安全适应性指标体系

安全性是电力系统最重要的属性之一。《电力系统安全稳定导则》和《电力系统安全稳定控制技术导则》成功构建可靠的安全评价体系,把电力系统的安全等级划为三级,进而指挥电力系统三道防线建设,保障中国电力系统多年的高效安全稳定运行。在迈入大电网时代后,安全性评价体系得到迅猛发展,主题内容有:设备 $N-1$ 通过率、电压越限率、设备最大负载率、功角稳定性、频率稳定性、电压稳定性、系统惯性水平、直流故障系统最大频率变化速率、短路电流水平等。

### 2.2.5 可靠性适应性指标体系

电力系统可靠性理论主要用于确定系统可靠性水平,以进行科学规划设计和调度安排。这里采用国际上普遍采用的几项指标,具体为负荷削减概率、电力不足期望值、负荷削减平均持续时间、电量不足期望值(期望缺供电量)、停电影响严重性指标、功角稳定风险指标、电压稳定风险指标、频率风险指标等。

### 2.2.6 故障恢复适应性指标体系

近年来,大停电事故的频繁发生对社会和人民生活造成严重后果。大停电事故后系统能否迅速、安全、稳定的恢复运行具有重要社会意义。在此提出一些较为直观的评价指标,具体包括系统频率恢复速率、系统功角稳定恢复时间、线路潮流恢复时间、中枢点电压恢复时间等。

## 3 测试系统分析

### 3.1 源网协同规划算例

以 Garver-6 电力系统规划为测试算例,分别采用传统非协同规划方法与所提协同规划方案进行对比分析。算例系统进行机组及线路扩建前,L5 线路已经发生潮流超越限度的状况。如果研究 $N-1$ 故障,那么后果将更加严重。所以亟需对线路和电源实现改扩建。

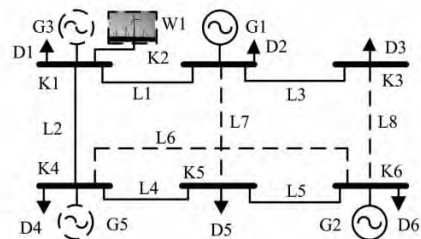


图3 Garver-6 电力系统规划结构

非协同规划情况下,电源规划选择扩展投建 W1,电网规划结果增加线路 L6、L7、L8,规划网络结构如图3所示。这个规划方案把很多待选的线路进行扩建,电网的投资建设花费较高,达到1.4亿元,相应的电源投资建设和运行花费为2.143亿元,规划水平年源网总费用为3.543亿元。

通过所提出的基于ADMM算法的网源分布式协同规划策略实现协同规划运算。ADMM分布式协同规划和集中式协同规划的计算结果见表1,可见,集中式与ADMM分布式2种策略均推出W1、G3、L7、L8投资建设,G4、L6无需投资建设的规划设计方案。2种模型运算得出的规划水平每年源网总花费相同,都为2.903亿元,表明基于ADMM策略的源网分布式协同规划可实现和集中式统一源网规划模型一样的精度,且运算结果相同。

虽然集中式协同规划计算耗时较少,但该方法与实际中“厂网分开”的电力市场管理模式不符(电厂与电网分属不同的利益决策主体)。分布式协同规划解决了集中式方法信息传递量大、信息私密性差等重要问题,因而更具有实际意义。此外,由于所提方案是在单机环境中运行分布式协同规划的计算程序,若采用多台计算机构建的分布计算资源,将有望有效提升计算效率。

规划后的网络结构如图4,其中浅色实线表示

新增加的电源或输电线路。与非协同规划中所提出的扩建1台机组3条线路的方案相比,协同规划方案采用扩建2台机组与2条线路的方案,总体上看,更具有经济性。

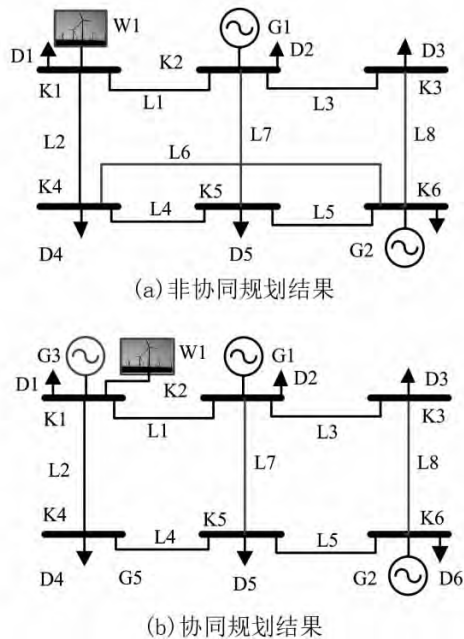


图4 非协同规划与协同规划的网络结构对比

表1 协同规划方案

求解形式	电源状态			线路状态			N	t/s
	W1	G3	G4	L6	L7	L8		
集中式协同规划	1	1	0	0	1	1	—	12.2
ADMM 协同规划	1	1	0	0	1	1	62	82.1

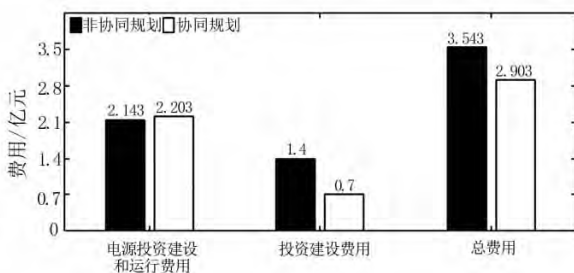


图5 非协同规划、协同规划费用对比

图5对比非协同规划、协同规划2种方案的费用情况,可以看出,协同规划的总费用为2.903亿元,相较非协同规划总费用(3.543亿元)减小18.1%,经济性比非协同规划方案更好。在非协同方式条件下,电源规划只研究电源投资建设和运行费用最少,得出电源投资建设和运行费用是2.143亿元,少于协同规划方案的电源投资建设和运行费用2.203亿元。但是因为电源规划和电网规划互相分割、串联进行,造成电网规划的费用(1.4亿元)远大于协同规划方案下的费用(0.7亿元)。综合分析

可得,由于协同规划方案具有全局最优化的分析结果,造成协同规划方案的源网投资和运行费用少于非协同规划方案。

### 3.2 多适应性评价指标体系

从经济发展适应性、能源结构适应性、电网结构适应性、网架安全适应性、可靠性适应性和故障恢复适应性等6个评价体系的角度的详细计算源网协同算例的多适应性指标,并得出下面结论。

#### 3.2.1 经济发展适应性

在非协同方式条件下,电源规划只研究电源投资建设和运行费用最少,得出电源投资建设和运行费用是少于协同规划方案的电源投资和运行费用。由于电源规划和电网规划互相分割、串联进行,造成电网规划的费用远大于协同规划方案下的费用。综合分析可得,由于协同规划方案具有全局最优化的分析结果,造成协同规划方案的源网投资和运行费用少于非协同规划方案。协同规划的总费用比非协同规划总费用小,经济性比非协同规划方案更好。

#### 3.2.2 能源结构适应性

协同规划方法所得到的新增电厂方案为一个风电和一个火电厂站,故相比于非协同规划中仅新增一个风电场站的结果,其能源结构适应性更强。但在受部分线路传输容量上限所导致的潮流约束下,非协同方案的机组出力效能则相比不如协同规划。为此,由于协同规划方案具有全局最优化结果,使得协同规划方案在损失部分清洁能源的情况下,机组利用率更高,能源结构适应性更强。

#### 3.2.3 电网结构适应性

协同规划与非协同规划方法所得到的网源规划方案在电网结构适应性方面,由于协同规划方案所需新增线路数量更少而新增机组相对更多,故前者方案在结构适应性相关的线机比、变机比、水电通道等方面相比后者非协同规划方法略弱,但仍能保证其自身电网结构适应性的要求。

#### 3.2.4 网架安全适应性

协同规划与非协同规划方法所得到的网源规划方案在网架安全适应性方面,均可满足潮流N-1收敛、电压越限率、频率稳定、电压稳定及短路电流要求,故均具备良好的网架安全适应性。

#### 3.2.5 可靠性适应性

协同规划方案电源更多,其负荷削减概率、电力不足期望值、负荷削减平均持续时间、期望缺供电量、

停电影响严重性等可靠性指标优于非协同规划方案。

### 3.2.6 故障恢复适应性

协同规划下,电网中含有的有功、无功备用容量及转动惯量水平相对更大,故当其线路在发生 $N-1$ 等大扰动故障后,系统电压、频率、功角等状态所需恢复至平稳状态的时间更短,因此其故障恢复适应性相对更强。

## 4 四川电网多适应规划体系综合评价

从经济发展适应性、能源结构适应性、电网结构适应性、网架安全适应性、可靠性适应性以及故障恢复适应性等6个一级评价指标出发,详细计算四川电网十三五规划网架多适应性指标,并得出下面结论。

### 4.1 经济发展适应性

1) 四川电网2020年目标网架能够满足电力平衡需求,在电力平衡系数最小的丰水期大方式运行条件下(1.187),即使功率因数低于0.95也能够有效保证系统用电需求。

2) 4种基本运行方式下系统网损率均低于参考值5%,经济性较好。丰水期系统负荷以及外送功率较大且水电占比较高、电源分布不均,大量水电转运过程中水电通道负荷较重,无功需求较大,故此系统有功损耗、无功损耗较大,系统网损率较高;枯水期系统负荷以及外送功率较小,水电占比相对较小,火电机组比重升高,省内电源分布较丰水期更均匀,各500 kV线路负荷相对较轻,有功损耗、无功损耗均较小,系统网损率相对较低。

3) 4种基本运行方式下500 kV线路平均功率因数仅丰大方式高于参考值0.95,其余3种运行方式下平均功率因数均低于参考值0.95,枯水期功率因数尤为低下,需采取相应措施提升线路的功率因数,以此提高线路利用率及系统运行经济性。

4) 4种基本运行方式下500 kV变电站平均功率因数均低于参考值0.95,可采取相应措施提升变电站功率因数,以此提高变压器利用率及系统运行经济性。

### 4.2 能源结构适应性

1) 至2020年,四川省内清洁能源出力占比较高,丰水期清洁能源出力占比超过90%,枯水期清洁能源出力占比也基本保持在80%左右,清洁能源利用率全国遥遥领先。

2) 至2020年,四川省清洁能源跨区消纳比重在丰水期超过50%,枯水期也可基本维持在40%,省内清洁能源外送比例较高,可有效支撑华中、华东地区用电需求。

### 4.3 电网结构适应性

1) 2020年四川省电网目标网架中直流线路供电配比均大于参考值2,均能满足直流线路供电需求,即使配套500 kV发生 $N-2$ 故障,仍然能够满足供电需求。

2) 二滩、康定、瀑布沟、锦屏4条水电通道供电能力配比保持在2左右,二滩、康定、瀑布沟3条水电通道发生 $N-2$ 故障后极有可能导致线路过载,需要加强通道建设,其余水电通道有较高的供电能力配比,即使发生 $N-2$ 故障也能有效保证水电外送。

### 4.4 网架安全适应性

1) 川渝三通道中洪沟—板桥2回线路,在丰水期运行方式下,负载率超过70%,一旦发生 $N-1$ 故障后,另一回非故障线路会发生潮流越限的危险,有极大的可能诱发另一回线路发生故障,导致四川省内大量功率盈余、重庆发生大量功率缺额,因此保证洪沟—板桥双回线路安全稳定运行,对于维持系统安全稳定运行有重要意义。

2) 4种基本运行方式中,洪沟—板桥、锦东—锦屏、二滩—盐源3条500 kV线路负载率会超过60%甚至70%,雅安、盐源两座500 kV变电站也存在较高的过载风险。

3) 丰水期大方式运行情况下,锦西—锦屏、康定—蜀州同塔线路发生 $N-2$ 故障后,潮流大量转移至另外几回线路,导致潮流发生越限,其他同塔线路发生 $N-2$ 故障后系统仍然能够保持安全稳定运行;丰水期小方式运行情况下锦西—锦屏同塔线路发生 $N-2$ 故障后,潮流大量转移至锦西—锦屏III线,导致潮流发生越限,其他同塔线路发生 $N-2$ 故障后系统仍然能够保持安全稳定运行;枯水期大方式运行情况下盐源—雅中同塔线路发生 $N-2$ 故障后,潮流大量转移至盐源—雅中III线,导致潮流发生越限,其他同塔线路发生 $N-2$ 故障后系统仍然能够保持安全稳定运行;枯水期大方式运行情况下同塔线路发生 $N-2$ 故障后系统仍然能够保持安全稳定运行。4种运行方式下,发生 $N-2$ 故障后不会对500 kV变电站有较大影响。

4) 发生直流闭锁故障后,丰水期较枯水期外送

功率较大,系统有功盈余量较大,最大频率上升速率较高;小方式较大方式开机量少,系统惯性水平较低,故此小方式下发生直流闭锁故障后,最大频率上升速率较高。

5) 基于2020年目标网架及4种基本运行方式数据,针对向上、宾金、锦苏、雅中4条大功率直流线路故障仿真分析得出,在丰水期大方式运行情况下若锦苏、雅中发生双极闭锁故障不采取措施的情况下将导致系统失稳,造成严重后果;其余情况下即使不采取相应措施,系统仍然能够保持稳定;丰水期小方式运行情况下雅中直流发生双极闭锁故障后系统暂态极值频率为50.9800 Hz,处于触发系统高周切机保护边缘;丰水期小方式运行情况下宾金、锦苏、雅中直流发生双极闭锁故障后系统准稳态频率值均高于50.2 Hz,超过准稳态规定标准,故此对于这些故障情况应及时采取相应措施的直流闭锁故障保护措施,以便应对直流故障系统大量功率盈余导致的系统频率稳定问题。

#### 4.5 可靠性适应性

1) 2020年四川省目标网架在4种基本运行方式下,负载率较高的重要线路发生 $N-1$ 、 $N-2$ 故障后,系统内500 kV节点电压偏移均在规定的偏移范围内,系统电压不会出现较大幅度波动。

2) 基于四川省2020年目标网架数据,在4种基本运行方式情况下,仅丰水期大方式情况下康定—蜀州 $N-2$ 故障情况下功角差为 $52^\circ$ ,其他重要线路发生 $N-1$ 、 $N-2$ 故障时系统功角差基本在 $50^\circ$ 范围内,表明目标网架在发生网内重要线路 $N-1$ 、 $N-2$ 故障时,系统稳定裕度较高,不易发生功角失稳。

3) 4种基本运行方式直流闭锁故障仿真结果表明,丰水期大方式运行情况下,锦苏、雅中直流发生双极闭锁故障后,系统频率风险严重度分别为64.3854、58.7077,远远超过参考值2.6,系统失稳,其他方式下发生直流闭锁故障系统频率风险严重度均小于参考值,系统能够自行恢复稳定运行。

4) 丰水期大方式运行情况下,雅中直流发生单极闭锁故障后,雅中换流站附近的盐源、月城、木里等3个节点暂态极值频率较高,尤其是盐源、木里两节点暂态极值频率超过51 Hz,超过规程规定的高速切机动作频率,但系统仍能保持稳定。

#### 4.6 故障恢复适应性

1) 总体上,直流故障后系统功率盈余量越大,

故障后频率偏差越大,系统频率平均恢复速率越慢,频率恢复时间越长。

2) 发生直流闭锁故障后,系统盈余功率越大,功角振荡幅度越大;距离故障直流线路换流站电气距离较近,直流配套电源功角振荡幅度情况较远离故障直流线路电源的功角振荡幅度大,功角振荡时间短;距离故障直流线路换流站电气距离较远的电源功角振荡幅度小,振荡时间较长。

3) 发生直流闭锁故障后,系统盈余功率越大,电压振荡幅度也呈现增大的趋势;距离故障直流线路换流站电气距离越近,节点电压振荡幅度越大,振荡时间越短;距离故障直流线路换流站电气距离越远,节点电压振荡幅度越小,振荡时间较长。

4) 发生直流闭锁故障后,系统电压会有较大的波动,需要采取相应措施稳定系统电压,以免由于电压波动导致直流连锁闭锁故障,带来更大的经济损失。

## 5 结语

建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业是国家电网有限公司新的长远发展战略目标。结合四川电网发展形势及存在的问题,针对高质量发展对电网规划的要求,从网源协调发展角度出发,研究大电网规划适应性理论。围绕经济发展适应性、能源结构适应性、电网结构适应性、网络安全适应性等多方面,对适应性规划理论、评价指标体系、网源协同规划模型与求解方法等关键问题展开研究,主要结论如下:

1) 深入分析能源转型背景下四川电网的发展形势。四川电网作为西南电网的核心组成部分,需在更大范围内寻求跨越式发展,着力提升电网规划适应性,以先进的规划理念构建全国优质的清洁能源送端枢纽系统,在更大程度上消纳清洁能源,服务绿色发展。

2) 提出适应具有中国特色国际领先的能源互联网企业发展理念的电网多适应性规划方法。在建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业的视角下,从消纳清洁能源、促进源荷交互、激励多能互补等角度分析研究送端规划网架在能源利用、电网效率、协调发展、发展不确定性等因素下的适应性水平。从目的性、全面性、层次性、简明性等层面提出多适应性规划体系的构建原则。

3) 提出考虑多维复杂特征的电网分层适应性评估指标体系。从经济发展适应性、能源结构适应性、电网结构适应性、网架安全适应性、可靠性适应性、故障恢复适应性6个方面构建电网适应性规划多维分层评估指标体系。

4) 提出考虑分布式决策变量的网源协同多适应性规划策略。通过交替方向乘子法搭建源网规划决策主体的分布式优化求解流程与协同互动交互机制。网源协同多适应性规划技术能够应用于四川电网等大规模送端电网中,为电网规划、项目评审工作提供重要参考。

参考文献

[1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.

[2] Li T, Ye X, Zhu M, et al. Flexibility Planning of Transmission Grid Based on Correlation of Generation and Transmission[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227: 22018.

[3] 唐权,胥威汀,叶希,等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 83-92.

[4] 曾鉴,叶希,瞿小斌,等. 异步互联格局下川渝送端电网的频率稳定特性与控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 68-75.

[5] 叶琳浩,刘泽槐,张勇军,等. 智能用电技术背景下的配电网运行规划研究综述[J]. 电力自动化设备,

2018, 38(5): 154-163.

[6] 徐熙林,宋依群,姚良忠,等. 基于多层电价响应机制的主动配电网源-网-荷协调方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 9-17.

[7] 岳云力,秦砺寒,李博,等. 含分布式电源配电网的“源网荷”协调规划体系[J]. 能源工程, 2016(6): 17-21.

[8] 曾顺奇,汤森垲,程浩忠,等. 考虑源网荷储协调优化的主动配电网网架规划[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 35-43.

[9] 赵书强,索琦,马燕峰. 高比例可再生能源的多点容量规划方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 8-15.

[10] 舒隽,王圆圆,韩冰. 计及碳捕集系统的源网协调规划模型[J]. 现代电力, 2017, 34(3): 25-29.

[11] 高强,陈刚,王天群,等. 基于线性规划的源网荷储协调控制系统[J]. 电子设计工程, 2019, 27(21): 27-31.

[12] 王晔,叶希,唐权,等. 基于广义灵活性指标体系的输电网扩展规划[J]. 电力建设, 2019, 40(3): 67-76.

[13] 李婷,叶希,唐权,等. 基于交替方向乘子法的源网协同多适应规划. 电力建设, 2017, 38(11): 105-112.

[14] 钟嘉庆,贺勇,陈冰,等. 考虑相关因子的基于可信性理论的厂网协调规划[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 16-24.

[15] 张宁,代红才,胡兆光,等. 考虑系统灵活性约束与需求响应的源网荷协调规划模型[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 61-69.

作者简介:

汪荣华(1964),男,高级工程师,主要从事电力系统规划与设计研究工作。

(收稿日期:2020-08-14)

(上接第26页)

1) 对于500 kV变电站,采用折线法进行防雷保护,与滚球法相比,避雷针的数量较少,为了实现对500 kV主变压器进线跨线、220 kV主变压器进线跨线的保护,500 kV、220 kV进线构架的避雷针高度较高。采用滚球法进行防雷保护,为了实现对35 kV场地设备的保护,需加密避雷线柱的设置。

2) 500 kV与220 kV区域采用相同高度的避雷针或避雷线柱进行保护,折线法、滚球法计算的保护裕度是接近的。对于35 kV场地设备、500 kV主变压器进线跨线、220 kV主变压器进线跨线区域,两种计算方法的差别较明显。

3) 对于重要的保底变电站,采用滚球法进行防雷保护范围校验,35 kV场地设备区域的计算结果

相对折线法来说是偏严的,能达到更好的防护效果。

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社出版, 2014.

[3] 中国电力工业部. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997 [S]. 北京: 中国电力出版社出版, 1997.

[4] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations: IEEE Std 998—1996 [S]. America: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996.

作者简介:

殷勤(1989),女,工程师,硕士,主要从事变电站和换流站设计的相关研究工作。(收稿日期:2020-04-17)