

考虑需求侧管理的低碳电网规划

程耀华^{1,2}, 张 宁^{1,2}, 康重庆^{1,2}, 孟珩遐³, 闫华光³

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084; 3. 中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要: 实现面向低碳目标的电网规划能有效缓解电力行业的“碳锁定”效应, 促进电力系统的低碳化转型。需求侧管理能够减小电源和输电容量需求, 同时可以降低系统发电煤耗和输电网损, 是降低电力系统碳排放的重要手段。文中分析了需求侧管理和低碳化发展对电网规划的影响, 分析了典型的需求侧管理手段在约束条件中的表现形式, 建立了考虑需求侧管理的低碳电网规划模型。针对模型的非线性特征设计了优化求解策略, 基于分离不等式法消除模型的非线性约束, 将原模型转化为混合整数线性规划模型进行求解。采用 IEEE RTS79 系统的算例验证了文中所述方法的有效性。算例结果表明, 在电网规划中考虑需求侧管理, 能够有效减少电网扩展投资并降低系统的碳排放量, 提升系统整体效益。

关键词: 电网规划; 碳排放; 需求侧管理; 低碳化发展; 多场景

0 引言

为应对全球气候变暖的挑战, 各国政府和相关组织纷纷采取了积极的措施。1992 年, 联合国大会通过并签署了《联合国气候变化公约》^[1], 并进一步于 1997 年制定并通过了《京都议定书》^[2], 以限制人类活动的温室气体排放。2003 年, 英国政府发布国家能源白皮书, 首次提出了“低碳经济”的发展理念^[3]。中国作为一个负责任的大国, 一直积极主动参与应对全球气候变化, 为缓解温室效应作出了巨大贡献。在 2009 年的哥本哈根气候大会上, 中国政府承诺 2020 年实现单位国内生产总值(GDP)CO₂ 排放量较 2005 年下降 40%~45%, 这为中国推进节能减排工作带来了严峻的挑战。

电力行业作为主要碳排放源, 实现低碳发展是低碳经济形势下电力行业发展的新主题。电力行业具有明显的“碳锁定”效应, 即在未来相当长一段时期的电力系统碳排放状况将被当前系统的电源及电网结构锁定^[4]。实施面向低碳目标的电网规划与运行可以有效缓解电力行业的“碳锁定”效应, 促进电力行业的低碳化发展^[5], 已经得到了国内外学者的广泛关注^[6-9]。

需求侧管理是电力市场环境下出现的一种新的用电管理模式, 通过行政或经济手段使用户参与负荷调节, 已得到广泛关注, 并被许多的电网公司所采用。传统电力管理模式下, 电力系统通过单纯地扩大电源和输电容量来满足不断增长的高峰负荷需求, 使得输变电设备的利用率低下。需求侧管理的引入突破了这种管理模式, 从更高的层次上处理电力供应与电力需求之间的关系^[10]。

在用户侧, 需求侧管理可以通过引导用户提高节电意识, 改善用电行为, 削减不必要的用电需求, 促进电力系统碳排放量的减少; 在电网侧, 需求侧管理可以促进负荷整形, 提高负荷率, 减少机组启停次数, 减小电源和输电容量需求, 延缓网架投资, 降低因不必要的投资而导致的碳排放。因此, 在电网规划过程中考虑需求侧管理, 是实现电力行业低碳化发展的有效途径。

文献[11-14]研究了需求侧相关资源在电网规划方面的应用。文献[11]以 Pool 市场定价模式为基础, 提出了一种包含用户需求弹性的输电网规划方法, 该方法综合考虑了方案投资和运行成本。文献[12]在对传统电网规划和综合资源优化规划的基础上, 提出了几点考虑需求侧管理的电网规划新思路。文献[13]提出了将需求侧资源纳入输电网规划的新思路, 论证了需求侧管理资源引入电网规划的可行性, 明确了规划要素、参与主体和规划流程。文献[14]研究了大规模风电接入对电网规划的影响,

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-05-31。

上网日期: 2016-08-19。

国家杰出青年科学基金资助项目(51325702); 国家电网公司科技项目“电网低碳化分析与评价的基础理论与方法研究”。

提出了考虑需求响应的大规模风电接入的电网规划模型。

文献[15-18]进行了低碳与电网规划结合方面的研究。文献[15]在传统的电网规划模型中引入了碳排放成本,利用 Weibull 分布模拟未来的碳交易价格,并将其引入目标函数中,建立了考虑碳排放费用的电网规划模型。文献[16]在全面考虑电网环节低碳相关要素的基础上,提出了适应低碳电源发展的低碳电网规划模型与方法。文献[17]在电网规划中考虑碳交易收益,同时考虑风电出力、负荷增长、网络状态、碳排放价格等的不确定性,建立了切负荷机会约束的概率规划模型。文献[18]对低碳经济下出现的新要素及其对电网互联的影响进行了分析,在目标函数中考虑了低碳技术的成本及碳交易费用,并将碳减排目标引入约束条件中,建立了低碳经济下以规划期联网综合效益最大作为目标函数的联网规划模型,综合反映了联网的经济效益和环境效益。

上述文献对需求侧管理或低碳在电网规划中的应用进行了探讨,但是都忽略了需求侧管理所带来的低碳效益。实际上,电网作为连接发电侧和用户侧的中间环节,可以通过与需求侧的协调,对电力需求侧进行有效的管理,提高电能使用效率和电网供电效率,从根本上降低电力系统的整体碳排放,实现电力行业的低碳化发展。因此,低碳经济下,在电网规划环节充分考虑需求侧管理的低碳效益,是实现电力系统低碳化发展的有效途径。

本文在传统电网规划研究的基础上,充分考虑需求侧管理和低碳化发展,将低碳化发展和需求侧管理纳入电网规划环节,建立了考虑需求侧管理的低碳电网规划模型。在本文的电网规划模型中,实现了对需求侧管理的精确建模,给出了需求侧管理相关的约束条件,通过将需求侧管理纳入决策变量,可实现需求侧管理方案的最优决策。通过需求侧管理和低碳的结合,可充分发挥需求侧管理的效益,减少线路投资,降低系统碳排放量,显著提升单位投资的碳减排效益。

此外,本文针对模型的非线性特征设计了优化求解策略,利用分离不等式方法消除非线性约束,将模型转化为大规模的混合整数线性规划模型进行求解。在模型中,以需求侧管理实施方案及线路建设方案作为决策变量,为电网公司进行需求侧管理决策及电网规划决策提供技术指导。最后,采用 IEEE RTS79 系统开展算例分析,验证了模型的有效性。

1 低碳化发展和需求侧管理对电网规划的影响

需求侧管理通过与用户互动,使得部分刚性负荷成为灵活可调节资源并参与系统的运行调节,可以实现对负荷曲线的整形和修正,提高电能的利用效率,降低不必要的投资带来的碳排放,是电力行业实现低碳化发展中不可忽视的途径。需求侧管理的实施有多种手段,包括行政手段、经济手段、技术手段、引导手段等^[19]。当前,国内电网公司普遍实施的需求侧管理主要以行政手段为主,由电网公司确定具体的实施方案规划,同时报送相关政府部门批准并发文,具体措施包括错峰、移峰、轮休、限电等。需求侧管理的另一重要手段是需求响应,主要是通过价格机制或激励机制引导用户侧调整负荷,具体措施有峰谷电价、分时电价、可中断负荷、需求侧竞价等。但目前实施的需求响应主要是短期响应,中长期需求响应尚未开展,因而对于电网规划的指导意义不大。因此,本文将选取错峰、移峰、轮休、限电等常态化的需求侧管理措施作为主要对象,分析需求侧管理和低碳发展目标对电网规划的影响,研究考虑需求侧管理的低碳电网规划。

1.1 低碳要素和需求侧管理在电网规划中的体现

电力行业的低碳要素主要包括低碳发电技术、低碳发展目标,以及碳排放交易机制的开展等方面。对于电网规划而言,通常将低碳要素作为单独的变量引入模型的目标函数或约束条件中,具体处理方式如下:将碳排放成本内部化,纳入模型的目标函数;引入相应的 CO₂ 减排约束,如碳排放总量约束或者减排目标约束。特别是在碳排放交易机制下,碳排放成为一种商品,电网公司可以选择到市场上购买或出售碳排放配额,此时在电网规划决策中还需要考虑相应的碳交易成本或收益。

需求侧管理通过与用户互动,可以削减地区尖峰负荷,修正负荷曲线,提高电网设备的利用率。因此,引入需求侧管理措施以后,电力负荷在一定程度上变得可控。电网规划环节,可以根据实际的负荷情况灵活运用需求侧管理措施实现整体效益的最大化,因此需求侧管理实施方案也成为电网规划中的决策变量。与此同时,在对待选电网规划方案进行经济性评价时,除了投资成本、发电成本及碳排放成本外,还需要考虑需求侧管理的实施成本,电网规划环节的经济性评价指标将更加丰富。

1.2 考虑需求侧管理的低碳电网规划模式

在电网规划环节充分考虑低碳要素,对于实现电力系统的低碳化发展十分重要。与此同时,需求

侧管理可以通过调节系统的负荷,实现低碳减排和减少电网输电设备投资的作用。因此,电网规划环节同时考虑低碳化发展和需求侧管理,有利于实现电网的节能低碳发展。根据上文中的分析,可以形成考虑需求侧管理的低碳电网规划模式框图,如图 1 所示。

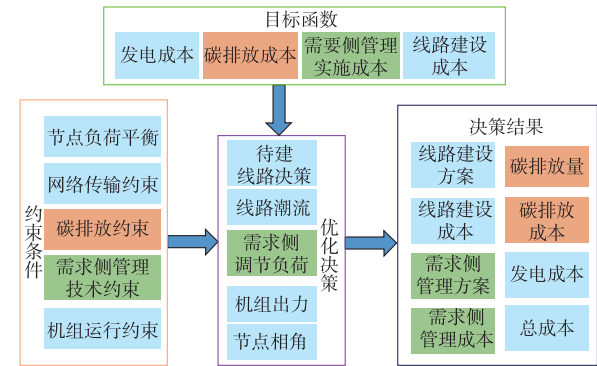


图 1 考虑需求侧管理的低碳电网规划模式框图
Fig.1 Framework of low carbon transmission expansion planning (TEP) considering demand side management

图中:蓝色模块代表传统电网规划的框架;黄色模块表示由于考虑低碳化发展所引入的新增项;绿色模块表示考虑需求侧管理引入的新增项。显然,需求侧管理和低碳化发展的引入,将对传统电网规划模型的决策变量、约束条件和目标函数都产生影响。需求侧管理的引入丰富了电网规划模型的决策变量,可以为电网公司确定需求侧管理的实施方案提供决策支持;碳排放约束和需求侧管理技术约束等的考虑又给优化过程带来了更多的约束条件,进一步缩减了优化空间的可行域,此外需求侧管理的灵活调节能力松弛了原有的负荷平衡约束;而对于碳排放成本和需求侧管理实施成本的考虑,又极大地影响了模型的优化目标。

2 考虑需求侧管理的低碳电网规划模型

基于上文分析,本文建立了考虑需求侧管理的低碳电网规划模型。由于目前中国的碳排放交易市场仍处于试点阶段,电网企业尚未被纳入强制减排体系,因此模型中不考虑碳排放约束及相关的碳交易机制。

2.1 模型的场景构成

本文的电网规划模型,选取多个场景进行分析,根据每个场景的负荷情况形成相应的运行约束,以精细化地模拟系统的运行。这里的场景并不是指概率分析中的场景,而是指系统的典型日,每一个典型日可作为一个场景。在本文的分析中,选取若干个典型日作为模型考虑的系统运行场景,每个场景出

现对应一定的持续天数,表示目标系统一年内与该场景相似的运行场景的天数。此外,除了根据负荷的特性选取典型日作为模型的分析场景外,还可以根据全年的需求侧响应特性选取典型场景。

需要说明的是,系统分析中场景的如此处理方式十分灵活,既可以较为简单地选择几个典型场景作为全年的代表,也可以把一年中的每一天作为一个场景,实现逐日的运行模拟以提高准确度。表 1 所示为不同情况下的场景构成方式,实际分析中可以根据问题需要灵活选取,这一点也体现了本文所建立模型的通用性和实用性。

表 1 不同的场景构成方式 Table 1 Different scenario composition mode	
场景数	场景构成方式
1	一年中负荷最大的一天作为场景
2	夏季典型日和冬季典型日各为一个场景
4	夏季大负荷、夏季小负荷、冬季大负荷、冬季小负荷 4 个典型日各为一个场景
4	每一季度选择一个典型日作为一个场景
12	每月选择一个典型日作为一个场景
365	一年中每一日为一个场景

每一个场景下,对应一套需求侧管理的优化决策,可根据该场景下的负荷情况灵活调节需求侧管理手段。所有场景下的需求侧管理决策就构成了电网规划中的需求侧管理优化实施方案,实现系统效益最大化,可为电网公司开展需求侧管理提供指导。

2.2 目标函数

电网规划是在满足安全与可靠性约束的前提下,以总成本最小作为目标^[20-21]。本文的电网规划模型的成本包括投资成本与运行成本两个方面:投资成本包括规划期内线路动态投资成本及其相应的碳排放成本;运行成本包括机组发电成本、机组碳排放成本、需求侧管理实施成本。本模型采用直流潮流模型,忽略电网损耗及其对应的碳排放成本。目标函数的表达式为:

$$\min C_T = C_1 + C_2 + C_3 \tag{1}$$

式中: C_1 为规划期内线路的投资成本; C_2 为运行成本,包括机组的发电成本和碳排放成本; C_3 为需求侧管理实施成本。

规划期内线路投资成本 C_1 的表达式为:

$$C_1 = \sum_{l=1}^{N_{LC}} C_l^{Line} U_l \tag{2}$$

式中: N_{LC} 为待建线路总数; C_l^{Line} 为线路 l 的线路投资成本等年值; U_l 为线路 l 的投建状态决策变量,为 0-1 变量, $U_l = 1$ 表示线路投建, $U_l = 0$ 表示线路不投建。

式(2)中线路 l 的投资成本等年值 C_l^{Line} 的表达式为:

$$C_l^{\text{Line}} = Q_l^{\text{Line}} \frac{n(1+n)^{Y_l^{\text{Line}}}}{(1+n)^{Y_l^{\text{Line}}} - 1} \quad (3)$$

式中: Q_l^{Line} 为线路 l 的投资金额(现值); Y_l^{Line} 为线路 l 的使用寿命; n 为资金折现率。

机组的发电成本和碳排放成本的表达式为:

$$C_2 = \sum_{s=1}^{N_S} d_s \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_G} (C_i^{\text{Gen}} P_{i,t,s} + e_i^{\text{Gen}} P_{i,t,s} \pi_{\text{CO}_2}) \right) \quad (4)$$

式中: N_S 为规划期内考虑的典型场景数; N_G 为发电机总数; T 为一个场景包含的时段数, 通常一个场景为一个典型运行日, 即取 $T=24$; C_i^{Gen} 为机组 i 的发电成本, e_i^{Gen} 为机组 i 的碳排放强度, C_i^{Gen} 和 e_i^{Gen} 随机组的类型和参数等的变化而不同, 但不随场景 s 或时刻 t 的变化而变化; $P_{i,t,s}$ 为场景 s 下发电机 i 在时刻 t 的优化出力; π_{CO_2} 为单位碳排放价格; d_s 为场景 s 的持续天数。

需要说明的是, 与文献[15-17]相同, 本文的电网规划模型中没有考虑机组的启停成本, 实际上启停成本在总运行成本中所占比重很小, 所以不会影响优化结果。

需求侧管理实施成本 C_3 的表达式为:

$$C_3 = \sum_{s=1}^{N_S} d_s \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_B} \sum_{m \in \Omega_D} \alpha_m D_{m,b,t,s} \quad (5)$$

式中: Ω_D 为需求侧管理手段集合; N_B 为节点数目; α_m 为需求侧管理手段 m 的实施成本, 不随场景 s 、时刻 t 及节点 b 的变化而变化; $D_{m,b,t,s}$ 为场景 s 下节点 b 采取需求侧管理手段 m 在时刻 t 所调节的负荷功率, 为优化模型的决策变量。

需要说明的是, 由于目标函数是总成本最小, 所以将需求侧管理的成本纳入目标函数中, 这部分成本对应于电网公司开展需求侧管理措施所需要给电力用户的补偿。但不能简单认为需求侧管理手段只有成本, 没有效益, 实际上需求侧管理的效益体现在减少输电线路的建设和降低碳排放总量上, 这一点在下文的算例分析中可以体现。

2.3 约束条件

2.3.1 常规约束

1) 规划期内各场景节点负荷平衡方程:

$$\sum_{i \in \Omega_{Gb}} P_{i,t,s} - \sum_{l \in \Omega_{1,b1}} F_{l,t,s} + \sum_{l \in \Omega_{1,b2}} F_{l,t,s} = L_{b,t,s} + \sum_{m \in \Omega_D} D_{m,b,t,s} \quad (6)$$

式中: $b=1, 2, \dots, N_B$; $t=1, 2, \dots, T$; $s=1, 2, \dots, N_S$; $\Omega_{1,b1}$ 为以节点 b 为首端节点的线路集合; $\Omega_{1,b2}$ 为以

节点 b 为末端节点的线路集合; Ω_{Gb} 为与节点 b 相连的发电机集合; $L_{b,t,s}$ 为场景 s 下节点 b 在 t 时刻的总负荷; $F_{l,t,s}$ 为场景 s 下线路 l 在 t 时刻的潮流, 包括已建线路和待选线路。

与常规电网规划中的负荷平衡约束不同的是, 需求侧管理手段的引入使得该约束方程具有了一定的松弛能力, 可以通过对需求侧管理的调节, 较为灵活地满足系统的电力负荷平衡。

2) 规划期内, 对于已经存在的线路, 应满足潮流约束方程:

$$F_{l,t,s} - \frac{\theta_{b1,l,t,s} - \theta_{b2,l,t,s}}{X_l} = 0 \quad \forall l \in \Omega_{LE} \quad (7)$$

式中: X_l 为线路 l 的电抗; $\theta_{b1,l,t,s}$ 和 $\theta_{b2,l,t,s}$ 分别为场景 s 下线路 l 在 t 时刻首末端节点的相角; Ω_{LE} 为已建线路集合。

3) 规划期内对于待选线路, 若选择投运则应满足潮流方程约束, 若不投运则潮流为 0, 其约束方程为:

$$F_{l,t,s} - \frac{U_l(\theta_{b1,l,t,s} - \theta_{b2,l,t,s})}{X_l} = 0 \quad l=1, 2, \dots, N_{LC} \quad (8)$$

4) 已建线路潮流上下限约束:

$$-F_{l,\max} \leq F_{l,t,s} \leq F_{l,\max} \quad \forall l \in \Omega_{LE} \quad (9)$$

式中: $F_{l,\max}$ 为机组 i 有功出力的最大值。

5) 待建线路潮流上下限约束:

$$-U_l F_{l,\max} \leq F_{l,t,s} \leq U_l F_{l,\max} \quad l=1, 2, \dots, N_{LC} \quad (10)$$

该约束表明, 若待建线路投建, 则其潮流不能越限; 反之, 若不投建, 则潮流为零。

6) 发电机出力上下限约束:

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t,s} \leq P_{i,\max} \quad i=1, 2, \dots, N_G \quad (11)$$

式中: $P_{i,\min}$ 为机组 i 有功出力的最小值。

2.3.2 需求侧管理技术约束

需求侧管理本身的技术限制给电网规划带来了新的约束条件, 如下所示。

7) 需求侧管理调节能力约束:

$$D_{m,\min} L_{b,t,s} \leq D_{m,b,t,s} \leq D_{m,\max} L_{b,t,s} \quad \forall m \in \Omega_D \quad (12)$$

式中: $D_{m,\min}$ 和 $D_{m,\max}$ 分别为需求侧管理手段 m 所能调节负荷比例的最小值与最大值。该约束表明, 需求侧管理手段对负荷的调节能力有限, 需求侧管理调节的负荷功率只能在这一范围内进行。

8) 对于错峰、移峰及轮休措施, 还需要满足如下约束条件:

$$\sum_{t=1}^T D_{m,b,t,s} = 0 \quad \forall m \in \Omega_{D1} \quad (13)$$

式中: Ω_{DI} 为错峰、移峰和轮休3种需求侧管理措施的集合。该约束表明采取这3种措施,只是将负荷进行转移,日用电量仍保持不变,保证与实际情况相符合。

9)节点最大可调节负荷约束:

$$-T_{\max,b}L_{b,t,s} \leq \sum_{m \in \Omega_D} D_{m,b,t,s} \leq T_{\max,b}L_{b,t,s} \quad (14)$$

式中: $T_{\max,b}$ 为节点 b 负荷的最大可调节比例。该约束表明实际负荷能调节的比例有限,对负荷的调节只能在这个比例范围内进行,同时也可以避免出现系统负荷的峰谷倒置等非正常情况。

10)对于可平移、不可削减的负荷,还需满足日用电量不变的约束:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m \in \Omega_D} D_{m,b,t,s} = 0 \quad \forall b \in \Omega_B' \quad (15)$$

式中: Ω_B' 为可平移、不可削减的负荷节点集合。

式(1)至式(15)共同构成了本文所提出的考虑需求侧管理的低碳电网规划模型,决策变量为 $F_{l,t,s}, P_{i,t,s}, D_{m,b,t,s}, \theta_{b,t,s}$ 及 U_l ,其余量为已知量。

3 模型特点分析与求解策略

上文中建立的电网规划模型可以分为投资决策和运行模拟两部分。投资决策部分体现在:规划年线路的投资决策变量 U_l ,反映了线路 l 的建设与否;运行模拟部分体现在:根据规划年线路的投建情况,形成节点负荷平衡方程约束、线路潮流约束、机组出力约束及需求侧管理技术约束等运行约束。

规划期内,选取了 N_s 个典型场景进行分析,每一个场景都有对应的运行约束。一旦各线路的投建状态确定以后,各场景之间完全解耦,但由于每一个场景都会对线路的投建决策产生影响,所以各场景之间又具有一定的耦合关系。典型场景数目选取得越多,模型对于实际系统运行模拟的准确性也越高,但也带来了计算量的增加。

模型中,需求侧管理的影响主要体现在节点负荷平衡方程(式(6))中,变量 $D_{m,b,t,s}$ 的存在使得节点负荷平衡方程具有一定的松弛能力,可以通过该变量 $D_{m,b,t,s}$ 的取值,调节需求侧管理手段,使原本无法满足的负荷方程得以满足。如果不考虑需求侧管理,那么负荷平衡变为完全紧约束,必须新建部分线路以满足尖峰负荷的需求。因此,需求侧管理的引入降低了对新建线路数目的要求。当然,由于需求侧管理本身的技术限制,也给模型引入了新的约束条件(式(12)至式(15))。此外,目标函数中除了线路建设成本、发电成本和碳排放成本之外,还包括需求侧管理的实施成本,这表明电网公司可以选择

将一部分建设线路的资金用于实施需求侧管理,电网公司在新建线路与开展需求侧管理之间进行权衡,通过模型的优化结果实现最优决策。

待建线路潮流方程约束(式(8))中,由于投建状态决策变量 U_l 及节点相角 $\theta_{b1,l,t,s}$ 和 $\theta_{b2,l,t,s}$ 都是决策变量,因而该约束为非线性约束,使得原问题变为混合整数非线性规划问题。实际上该约束表明,若线路 l 投建,则需要满足直流潮流方程约束;反之,若不投建,则约束不存在。为了便于求解,可以利用分离变量法将其转化为线性约束,如下式所示:

$$-M(1-U_l) \leq F_{l,t,s} - \frac{\theta_{b1,l,t,s} - \theta_{b2,l,t,s}}{X_l} \leq M(1-U_l) \quad l=1,2,\dots,N_{LC} \quad (16)$$

式中: M 为一个很大的正数。当线路 l 投建时, $U_l=1$,此时约束变成直流潮流方程等式约束;当线路不投建时, $U_l=0$,此时约束松弛。因此,经过等效以后,原模型退化成一个混合整数的线性规划模型,求解更为简单,可调用商业软件包(如CPLEX)求解。

4 算例分析

本文采用IEEE RTS79系统,利用上文建立的考虑需求侧管理的低碳电网规划模型进行算例分析。由于本文考虑的是输电网扩展规划,因此算例中将对原有的IEEE RTS79系统进行相应的修改,以便更好地验证模型的有效性。

4.1 基础数据

IEEE RTS79系统的原始网络参数可从MATPOWER软件包中获取,最大负荷为2 850 MW。为验证本文所建立的电网规划模型,将所有节点的负荷增加为原来的1.6倍。夏季大负荷、夏季小负荷、冬季大负荷、冬季小负荷4个典型日作为算例分析中的典型场景,每个场景的持续天数为365 d的1/4。选取国内某省在4个场景下的典型负荷曲线作为各节点的负荷变化情况,并设定当前系统的碳排放价格为100元/(tCO₂)。为了说明低碳化发展对电网规划的影响,在7号节点配备装机容量为1 000 MW的水电机组。电源参数如表2所示。

为满足负荷增长的需求,在网络中新建9个线路走廊,每个已有线路走廊和新建线路走廊可新建1回输电线路。

在本算例中考虑错峰、移峰、轮休及限电等4种常态化的需求侧管理措施。通过调查、统计得到各种需求侧管理手段及其对应的成本如表3所示。在实际的电力生产中,一般只有在迫不得已的情况下

才会采用限电的措施,且电网企业作为公用事业单位,需要承担社会责任,应尽可能保证供电可靠率,因此在实际的需求侧管理实施中,很少使用限电措施。基于此,在本文的算例中将限电的成本设定得很高,即不考虑限电为常态化的需求侧管理措施。

表 2 IEEE RTS79 系统电源数据

Table 2 Generator parameters of IEEE RTS79 system

机组所在节点	机组容量/MW	机组类型	运行成本/ (美元·(MW·h) ⁻¹)	碳排放强度/ (tCO ₂ ·(MW·h) ⁻¹)
1	400	燃煤	310	0.905
2	400	燃煤	286	0.746
7	1 000	水电	0	0
13	591	燃气	600	0.462
15	215	火电	350	0.500
16	155	火电	400	0.300
18	400	燃气	593	0.431
19	200	火电	350	0.500
20	800	燃气	500	0.500
21	500	燃煤	350	0.500
22	500	燃煤	310	0.905
23	660	燃煤	350	0.500

表 4 传统电网规划与低碳电网规划结果对比

Table 4 Results comparison between traditional TEP and low carbon TEP

电网规划方法	新增线路	新增线路总数	线路建设费用/亿元	总发电费用/亿元	碳排放成本/亿元	发电成本+线路建设成本/亿元	发电+碳排放+线路建设成本/亿元	系统总碳排放量/亿 t
传统电网规划	4-7,6-7,7-8,15-16,15-21	5	1.423	88.74	16.8	90.163	106.963	0.168
未引入需求侧管理的低碳电网规划	4-7,6-7,7-8(2),7-9,15-16,15-21	7	1.897	83.57	15.7	85.467	101.167	0.157

从表 4 的结果可以看出,与常规电网规划相比,低碳电网规划下新建增加了 7-8 与 7-9 两回输电线路,线路建设费用相应增加。但与此同时,可以降低发电成本和碳排放成本,实现总体成本最小。

从经济角度分析,由于水电的发电成本为零,而且不产生碳排放,因此为降低发电成本,应新建线路使 7 号节点处的水电尽可能多地接入系统。但是另一方面,新建线路会带来建设成本的增加,因此低碳电网优化规划的结果是 7 号节点水电的接入所降低的系统运行成本与新建线路所增加的建设成本之间的博弈。而在低碳电网规划模式下,由于引入了碳排放成本,水电的零碳排放特性所带来的减排效益进一步增加了水电的优势。因此,优化结果中新建了两回输电线路以更多地接入 7 号节点的水电。显然,系统的碳价越高,水电的优势越明显。

此外,从表 4 的最后一列可以看出,由于 7 号节点的水电接入增加,系统低碳电源比重增加,使得碳排放总量由 0.168 亿 t 下降到 0.157 亿 t,低碳化水平显著提升。

表 3 需求侧管理措施与对应成本

Table 3 Strategies and costs of demand side management

需求侧管理措施	最大可降低负荷水平/%	最大可提升负荷水平/%	成本/(元·(MW·h) ⁻¹)
错峰 A	2	-2	1 300
错峰 B	2	-2	1 800
移峰	3	-3	3 500
轮休	2	-2	5 000
限电	3	0	20 000

4.2 低碳化发展对电网规划结果的影响

本文提出的考虑需求侧管理的低碳电网规划模型,通过引入碳价,将碳排放成本嵌入优化目标函数中。为了说明低碳化发展对电网规划结果的影响,需要比较电网规划过程中考虑低碳要素和不考虑低碳要素的差异。在上文所建立的模型基础之上,如果不考虑需求侧管理措施的影响,而只在传统电网规划模型的目标函数中加入碳排放成本,则可形成低碳电网规划模型。传统电网规划与低碳电网规划的结果对比如表 4 所示。

4.3 考虑需求侧管理的低碳电网规划

上文中已经提到,电网公司通过引入需求侧管理措施,可以引导用户调节负荷,实现对负荷曲线的整形,提高输变电设备利用率,减少线路投资,降低系统碳排放量。

在考虑需求侧管理的低碳电网规划下,优化结果中,表 3 的 5 种需求侧管理措施都对负荷进行了调节,但是由于限电措施成本很高,所以限电措施带来的负荷调节量很小,使得典型日总用电量略有下降。为了说明需求侧管理措施对负荷曲线的调节效果,可选取任意一个典型场景下的负荷曲线作为研究对象。

图 2 给出了夏季大负荷场景下考虑需求侧管理前后负荷曲线的变化情况。图 2 中蓝色实线代表没有引入需求侧管理措施时系统的负荷曲线,即常规情况下的典型负荷曲线;红色虚线代表模型优化后,经过需求侧管理调整后的负荷曲线。

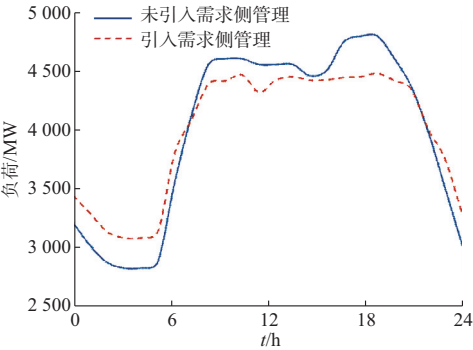


图 2 引入需求侧管理前后负荷曲线的对比
Fig.2 Comparison of load curves with or without demand side management

由图 2 可以看出,需求侧管理措施的引入,削弱了系统的高峰负荷,提升了低谷负荷,可以促进负荷整形,系统负荷率明显提升,对于减少输变电设备的投资具有正面作用。

低碳电网规划与考虑需求侧管理的低碳电网规

划结果对比如表 5 所示。

从优化结果可以看出,低碳电网规划中考虑需求侧管理以后,通过削弱尖峰负荷,无需新建线路 6-7 和 7-9 就能满足负荷的需求。此外,与不考虑需求侧管理的结果对比,不考虑碳排放成本时,总成本将由 85.467 0 亿元下降到 84.405 6 亿元。其中总发电费用降低为 82.89 亿元,一方面是由于需求侧管理措施使得总用电量略有下降,另一方面则是由于 7 号节点的水电出力增加,这部分费用的降低可以看成是需求侧管理带来的效益。同理,碳排放总量也相应地由 0.157 亿 t 下降到 0.154 亿 t,体现了需求侧管理的低碳效益,系统低碳化水平提升。实际上,在线路的生产、建设、运行直到回收的过程中,都将产生一定的碳排放,即线路的全生命周期碳排放。引入需求侧管理以后,新建线路数目减少,则对应的线路全生命周期碳排放也将减少。因此,如果计及这部分碳排放量,那么需求侧管理的低碳效益将更加突出。

表 5 电网规划结果对比
Table 5 Comparison of transmission planning results

电网规划方法	新增线路	新增线路总数	线路建设费用/亿元	需求侧管理成本/亿元	总发电费用/亿元	碳排放成本/亿元	发电+线路建设+需求侧管理成本/亿元	发电+碳排放+线路建设+需求侧管理成本/亿元	系统总碳排放量/亿 t
未引入需求侧管理的低碳电网规划	4-7,6-7,7-8(2),7-9,15-16,15-21	7	1.897		83.57	15.7	85.467 0	101.167 0	0.157
考虑需求侧管理的低碳电网规划	4-7,7-8(2),15-16,15-21	5	1.476	0.039 6	82.89	15.4	84.405 6	99.805 6	0.154

将表 4 第一行与表 5 第二行的结果进行对比,可以看出,与传统电网规划相比,考虑需求侧管理的低碳电网规划下,线路建设成本由 1.423 亿元增加到 1.476 亿元,这是由低碳和需求侧管理两个要素共同作用的结果。一方面,碳排放成本的引入增加了 7 号节点水电的优势,系统倾向于多建线路消纳水电;另一方面,需求侧管理措施降低了系统的高峰负荷,使得需要扩建的输电线路数目减少。两者共同作用下,虽然新建线路总数不变,但是线路 7-8 的成本高于 6-7,所以总成本上升。但是,在考虑需求侧管理的低碳电网规划下,发电成本由 88.74 亿元下降到 82.89 亿元,一方面来源于 7 号节点水电消纳的增加,另一方面由于需求侧管理使得系统负荷用电量略有下降,这部分发电费用的降低是由低碳和需求侧管理共同产生的。同理,系统碳排放总量由 0.168 亿 t 下降到 0.154 亿 t。

综合比较 3 种规划方法的结果,在电网规划中同时考虑低碳和需求侧管理,可以使总成本由

106.963 亿元下降到 99.805 6 亿元,其中的 5.796 4 亿元可以看成是引入低碳所降低的,另外的 1.361 亿元则是引入需求侧管理所降低的。

从碳减排效益上看,电网规划过程中如果仅考虑低碳化发展,那么需要增加线路投资 0.474 亿元,与此同时带来的 CO₂ 减排量为 0.11 亿 t;而如果同时考虑低碳化发展和需求侧管理,充分发挥需求侧管理的低碳效益,那么需要增加线路投资成本和需求侧管理成本综合为 0.092 6 亿元,可实现的碳减排量为 0.113 亿 t,显然此时单位投资的碳减排量显著提升。

综上所述,低碳经济下,在电网规划中考虑需求侧管理,可以有效减少电网扩展投资,提升负荷率,降低碳排放量,显著提升系统整体效益。

5 结语

本文在传统电网规划中结合需求侧管理和低碳化发展两大要素,分析了需求侧管理和低碳化发展

对电网规划的影响,建立了考虑需求侧管理的低碳电网规划模型。同时,利用分离不等式法将该模型简化为混合整数线性规划模型,以便于求解。

基于 IEEE RTS79 系统的算例分析结果表明,引入需求侧管理,可以实现对负荷曲线的修正,提升系统负荷率。低碳经济下,在电网规划中考虑需求侧管理,可以减少线路投资,降低系统碳排放量,显著提升系统的整体效益。综合而言,本文所提出的规划模型能充分考虑电网支持低碳电源接纳和引导用户侧合理用电两个环节的减排潜力,为低碳发展目标下的电网规划决策提供了新的思路。

参考文献

[1] UNGA. United Nations framework convention on climate change[EB/OL]. [2012-10-30]. http://en.wikipedia.org/wiki/United_Nations_Framework_Convention_on_Climate_Change.

[2] UNGA. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change [EB/OL]. [2012-10-30]. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng/html>.

[3] Secretary of State for Trade and Industry. Our energy future—creating a low carbon economy[R]. UK Energy White Paper, 2003.

[4] 康重庆,陈启鑫,夏清.低碳电力技术的研究展望[J].电网技术, 2009,33(2):1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.

[5] GRUBB M, JAMASB T, POLLITT M G. Delivering a low-carbon electricity system [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.

[6] SIRIKUM J, TECHANITISAWAD A, KACHITVICHYANUKUL V. A new efficient GA-benders' decomposition method; for power generation expansion planning with emission controls[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 1092-1100.

[7] 陈启鑫,康重庆,夏清,等.电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J].电力系统自动化,2009,33(15):18-23.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Key low carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.

[8] SRIVASTAVA S C, SRIVASTAVA A K, ROUT U K. Least cost generation expansion planning for a regional electricity board in India considering green house gas mitigation [C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology, December 4-7, 2000, Perth, Australia: 31-36.

[9] 娄素华,胡斌,吴耀武,等.碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J].电力系统自动化,2014,38(17):91-97.DOI: 10.7500/AEPS20140508005.
LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97. DOI: 10.7500/AEPS20140508005.

[10] 朱成章,徐任武.需求侧管理[M].北京:中国电力出版社,1999.

[11] 吉兴全,王成山.计及需求弹性的输电网动态规划方法[J].中国电机工程学报,2002,22(11):23-27.
JI Xingquan, WANG Chengshan. Transmission dynamic

expansion considering demand elasticity[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 23-27.

[12] 储琳琳,张亮,倪群辉,等.当前电力体制下考虑需求侧管理的新思路[J].电力需求侧管理,2010,12(5):9-13.
CHU Linlin, ZHANG Liang, NI Qunhui, et al. New thoughts about network planning considering demand side management based on current power system [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(5): 9-13.

[13] 宋毅,欧阳邵杰,王旭阳,等.考虑需求侧资源的新型电网规划模式[J].电力建设,2013,34(11):12-16.
SONG Yi, OUYANG Shaojie, WANG Xuyang, et al. New power grid planning model with considering demand side resources [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 12-16.

[14] LI Chengxin, DONG Zhaoyang, CHEN Guo, et al. Flexible transmission expansion planning associated with large-scale wind farms integration considering demand response[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2276-2283.

[15] KAZEROONI A K, MUTALE J. Transmission network planning under security and environmental constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 1169-1178.

[16] 杜尔顺,孙彦龙,张宁,等.适应低碳电源发展的低碳电网规划模型[J].电网技术,2015,39(10):2725-2730.
DU Ershun, SUN Yanlong, ZHANG Ning, et al. Transmission expansion planning model facilitating low-carbon power sources' development[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2725-2730.

[17] QIU Jing, DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, et al. A low carbon oriented probabilistic approach for transmission expansion planning[J]. Journal of Modern Power and Clean Energy, 2015, 3(1): 14-23.

[18] WU Yaowu, LOU Suhua, LU Siyu. A model for power system interconnection planning under low-carbon economy with CO₂ emission constraints[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2011, 2(3): 205-214.

[19] 国家电网公司电力需求侧管理指导中心.电力需求侧管理实用技术[M].北京:中国电力出版社,2005.

[20] LI Chengxin, CHEN Guo, LIU Junyong. A new method of enhancing reliability for transmission expansion planning[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(4): 341-349.

[21] 高赐威,吴天婴,何叶,等.考虑风电接入的电源电网协调规划[J].电力系统自动化,2012,36(22):30-35.
GAO Ciwei, WU Tianying, HE Ye, et al. Generation and transmission coordinated planning considering wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 30-35.

程耀华(1995—),男,博士研究生,主要研究方向:低碳电力技术、电力系统规划。E-mail: chengyh15@mails.tsinghua.edu.cn

张宁(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向:电力系统不确定性分析、多能源系统。E-mail: ningzhang@mail.tsinghua.edu.cn

康重庆(1969—),男,通信作者,教授,IEEE 高级会员,主要研究方向:电力系统规划、负荷预测、低碳电力技术、电力经济。E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

(编辑 章黎)

Low Carbon Transmission Expansion Planning Considering Demand Side Management

CHENG Yaohua^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}, KANG Chongqing^{1,2}, MENG Junxia³, YAN Huaguang³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,

Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The implementation of transmission expansion planning towards low carbon development can effectively alleviate the “carbon lock” effect in the power industry and facilitate the transition to low carbon power system. The demand side management (DSM) is able to reduce the needs of power supply and transmission capacity and further bring down the generation coal consumption and transmission losses. It is therefore an important means of carbon emission reduction in power system. The paper analyzes the impact of DSM and low carbon development on transmission planning at first. By analyzing the performance of typical DSM measures in the constraints, a low carbon transmission expansion planning model is established considering DSM. Nonlinear constraints in the planning model are transformed into linear ones using inequality separation method, turning the planning model into a mixed integer linear programming model. The case study shows the effectiveness of the proposed model with IEEE RTS79 system. The results suggest that considering DSM in the transmission expansion planning can effectively reduce the transmission expansion investment and the total carbon emissions, which can improve overall benefits of the power system.

This work is supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51325702) and State Grid Corporation of China.

Key words: transmission expansion planning; carbon emission; demand side management; low carbon development; multiple scenarios