

地区电网光伏消纳能力的提升策略

李宏仲¹,高宇男²,张雪莹³,林冬³,强伟¹,孙伟卿⁴

(1. 上海电力学院 电气工程学院,上海 200090;2. 国网绍兴供电公司,浙江 绍兴 312000;

3. 广东电网有限责任公司,广东 广州 510600;4. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:针对大规模光伏发电功率倒送造成传输通道发生阻塞的问题,提出一种传输通道潮流评估模型。利用传输通道负载率期望评估传输通道的负载率水平,利用传输通道潮流熵确定传输通道功率波动剧烈程度,在此基础上采用传输通道阻塞二维评定等级值判定传输通道发生阻塞的可能性大小。应用模糊数学的隶属度函数来决策消纳能力提升措施类型,利用逐步扩展法和灵敏度系数法分别指导网络解与非网络解的实施。通过某地区实际电网算例对所提方法的有效性进行了验证。

关键词:光伏发电;传输通道阻塞;负载率;潮流波动;消纳能力提升

中图分类号:TM 615

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.015

0 引言

大力发展可再生能源是应对能源短缺和环境污染的有效途径,预计到2020年,我国可再生能源装机容量达到7~7.22亿kW,占总装机的35%~36.1%,其发电量占全国总发电量的13%~15%^[1]。随着可再生能源接入规模的不断增大,弃风率、弃光率节节攀升,2016年西北五省(区)弃风率达33.34%、弃光率达19.81%^[2]。

受到地理区域、资源条件等多种因素的制约,我国大规模可再生能源电源分布与地区经济发展水平、负荷需求之间呈现出近似负相关的现状,可再生能源就地消纳困难、功率倒送异地消纳是不可避免的事实。风光资源丰富地区薄弱的网架传输能力,是抑制新能源发电异地消纳的重要原因。其次,可再生能源出力的时变特性加剧了电力系统的不确定性,潮流方向、大小频繁变化导致传输通道的阻塞现象发生^[3]。因此,如何有效地辨识传输通道的负载率水平和功率波动程度,并提出相应的改善措施,对提升可再生能源消纳能力具有重要的理论和应用价值。

近年来,众多学者对可再生能源消纳能力提升的问题进行了深入的研究。文献[4]结合电网生产运行实际情况,提出局部电网消纳能力受限的主要因素是新能源装机容量过剩、调峰能力不足和传输通道薄弱;文献[5]从系统灵活性的角度出发,统筹电源侧、负荷侧和储能装置进行可再生能源评估,但未考虑网架结构阻塞对消纳能力的影响;文献[6]通过对储热环节的控制来提高消纳能力,在仿真算例中也未考虑传输通道潮流约束;文献[7]基于状

态转移理论建立了线路运行严重度模型来识别最危险的支路,但未考虑负荷的时序特性;文献[8]在文献[7]的基础上考虑了负荷变化和双向潮流问题,但未给出具体的消纳能力的提升措施。

针对上述存在的问题,本文考虑“源-荷”长时间尺度特性,从传输通道负载率水平和传输功率波动剧烈程度2个方面建立了时序传输通道潮流评估模型,根据模型的二维评定值分析传输通道发生功率阻塞的难易程度,并从网络解和非网络解2个层面给出相应的提升措施,为电网企业应对光伏消纳提升问题提供新的解决思路。

1 传输通道潮流评估模型

在电力系统运行中传输通道(主要指线路和变压器)出现过载现象,称之为阻塞^[9]。光伏发电并网功率倒送出现潮流越限,短时会导致弃光现象制约消纳,长时间运行会导致元件损坏光伏电站脱网运行。

而传输通道出现阻塞现象取决于时序基态的负载率水平和“源-荷”变化引起的传输功率波动程度。评估模型分别利用传输通道负载率期望和传输通道潮流熵对负载率水平和功率波动程度进行描述,前者表征传输通道在整个时间尺度下的负载率情况,后者表征传输通道的时序潮流功率波动剧烈程度。

1.1 传输通道负载率期望

传输通道的负载率高是低是影响阻塞发生的重要因素。负载率越接近1,传输通道越容易发生阻塞现象。

设传输通道*i*的额定有功传输功率为 $F_{i,max}$,传输通道的实时潮流功率为 $F_{i,t}$,则传输通道*i*的实时负载率 $\mu_{i,t}$ 为:

$$\mu_{i,t} = |F_{i,t}/F_{i,max}| \quad (1)$$

收稿日期:2017-11-21;修回日期:2018-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777126)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777126)

其中, $i=1,2,\dots,l$ 为电网传输通道编号; $t=1,2,\dots,T$ 为计算时间尺度内的各个时段。以年为时间尺度,宏观上负荷与光伏功率波动具有周期性,以实际往年历史 8 760 个时段负载率序列进行计算最为可靠。若实际数据有限,在计算时也必须考虑季节和晴雨天气对功率波动的影响。

根据传输通道 i 的时序负载率序列 $\mu_i = [\mu_{i,1}, \mu_{i,2}, \dots, \mu_{i,T}]$ 形成概率型序列,利用期望值量化描述传输通道重载程度,则传输通道 i 的负载率期望值为:

$$E_i = \sum_{x=1}^y \mu_x \lambda_x \quad (2)$$

其中, λ_x 为某频率负载率 μ_x 在整个时间尺度 T 内出现的频率; y 为负载率总数。

1.2 传输通道潮流熵

传输通道潮流的负载率情况是电网出现阻塞难易程度的重要判据,但负载率只能从整体上描述系统的负载水平,却无法体现出传输通道的时序负载波动情况。低负载率的传输通道由于光伏或负荷功率剧烈波动,可能出现短时阻塞现象。因此,传输通道出现阻塞问题,不仅仅取决于负载率情况,而且还受传输通道潮流功率波动影响。

本文基于潮流熵理论^[10-11],考虑光伏发电的时序特性,利用传输通道潮流熵来描述传输通道的功率波动剧烈程度。方差用来计算每一个变量(观察值)与总体均数之间的波动,少数不正常负载率(极端天气或人为记录错误引起)对方差影响较大,而潮流熵是以概率区间的形式对负载率进行统计,不正常负载率区间的概率值极小且进行熵计算后近似为 0,因此,潮流熵比方差评估波动性具有更强的抗干扰能力。

根据设置的时间尺度,可得传输通道 i 的时序负载率序列 $\mu_i = [\mu_{i,1}, \mu_{i,2}, \dots, \mu_{i,T}]$,利用信息熵时域等间距法将序列共分为 m 个区间,若 m 非整数时向下取整^[12]:

$$m = 1.87(T-1)^{2/5} \quad (3)$$

设 k 表示负载率序列落入区间 $(\mu_n, \mu_{n+1}]$ 的个数 (μ_{n+1} 、 μ_n 分别为基于信息熵得出的概率区间的上、下限),则传输通道 i 负载率处于区间 $(\mu_n, \mu_{n+1}]$ 的概率为:

$$P_n = \frac{k}{T} \quad (4)$$

该区间的自潮流熵值为:

$$H_{i,n} = -P_n \ln P_n \quad (5)$$

得到传输通道 i 的潮流熵为:

$$H_{i,\Sigma} = \frac{1}{\ln m} \sum_{n=1}^m H_{i,n} = \frac{1}{\ln m} \sum_{n=1}^m (-P_n \ln P_n) \quad (6)$$

当负荷与光伏出力发生变动时,传输通道的负载率也随之变动,从而决定传输通道的潮流熵值的大小,如图 1 所示。

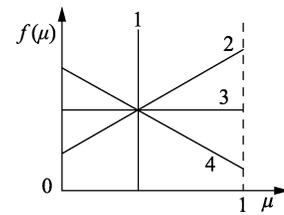


图 1 时序负载率序列分布

Fig.1 Distribution of sequential load rate sequence

图中直线 1、2、3、4 分别代表传输通道 i 的 4 种不同负载率的运行状态, $\mu \in [0,1]$ 为传输通道的负载率, $f(\mu)$ 为对应的概率密度函数,满足 $\int_0^1 f(\mu) d\mu = 1$ 。直线 3 表示该运行状态的时序负载率序列在各负载率区间等概率分布,此时 $P_1 = P_2 = \dots = P_m = 1/m$,则传输通道的潮流熵值最大 $H_{i,\Sigma} = 1$,表征该传输通道上的潮流功率在整个计算时间尺度上波动最为剧烈;直线 1 表示传输通道的时序负载率序列集中于同一负载率,此时 $P_n = 1, P_1 = P_2 = \dots = P_m = 0$ ($n \notin [1, m]$) 则该运行状态的潮流熵值最小 $H_{i,\Sigma} = 0$,表征该传输通道上的潮流功率保持固定值不变,功率传输极为稳定;直线 2、4 情况介于直线 1、3 这 2 种情况之间,直线 2 在高负载率的占比较多,曲线 4 在低负载率的占比较多,两者传输通道潮流熵值可能会出现相等情况,则表征两者波动剧烈程度相似,将借助传输通道负载率期望值加以区别出现阻塞的可能性。

1.3 传输通道阻塞二维评定分析

为了能更加明确地描述光伏发电接入对传输通道安全稳定运行的影响,本文提出传输通道阻塞二维评定分析方法。

将传输通道负载率期望划分为 4 个等级,等级越高,传输通道负载率越高,越易出现阻塞问题,传输通道负载率期望定性等级划分如表 1 所示。

表 1 传输通道负载率期望定性等级划分

Table 1 Qualitative level classification of load rate expectations of transmission channel

等级 A	负载率期望值所属区间	等级描述
1	[0,0.4)	轻载运行
2	[0.4,0.6)	正常运行
3	[0.6,0.8)	负载率稍高
4	[0.8,1]	重载运行

将传输通道潮流熵也划分为 4 个等级,等级越高,则传输通道的潮流功率波动越剧烈,就越容易出现阻塞问题,传输通道潮流熵的定性等级划分如表 2 所示。

基于传输通道负载率期望评估重载程度和传输

通道潮流熵评估波动大小的特点,建立传输通道阻塞二维评定等级,如表3所示。

表2 传输通道潮流熵定性等级划分

Table 2 Qualitative level classification of power flow entropies of transmission channel

等级 B	潮流熵值所属区间	等级描述
1	[0,0.4)	基本无波动
2	[0.4,0.6)	波动轻微
3	[0.6,0.8)	波动较强
4	[0.8,1]	波动剧烈

表3 传输通道阻塞二维评定等级划分

Table 3 Two-dimensional evaluation level classification of transmission channel congestion

传输通道负载率期望等级 A	传输通道潮流熵等级			
	$B=1$	$B=2$	$B=3$	$B=4$
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12
4	4	8	12	16

传输通道阻塞等级越高,表征传输通道重载情况越严重且传输功率波动越剧烈,出现长时间阻塞的可能性越大,亟待通过网络解除阻塞隐患。传输通道阻塞等级越低,表征传输通道轻载运行或传输功率波动越小,即使出现短时轻微重载情况,可通过非网络解来消除阻塞可能。

2 消纳能力提升措施

消纳能力提升措施可从网络解和非网络解2个层面考虑。网络解侧重改造电网消纳阻塞部分的网架结构,放宽功率传输约束,从而提高电网的消纳能力。非网络解侧重“源-荷”侧的管理来改变负荷用电、常规机组供电的时间特性,尽可能消纳更多的光伏发电功率,从而提高电网的消纳能力。

2.1 网络解

网络解层面解决阻塞问题的主要措施包括:在阻塞发生节点处加装联络线或增大线路传输容量上限,通过提高联络率或放宽线路容量约束解决阻塞问题;若功率倒送导致变压器过载,增大变压器容量提高输电容量;在阻塞发电节点处增加储能设备,使光伏发电曲线呈现削峰填谷趋势。

逐步扩展法是以减轻原有传输通道负载率水平多少来衡量待选传输通道的作用,选择恰当的待选传输通道来消除网络中的阻塞现象。增加少量传输通道相对整体网架结构影响甚微,可直接根据原始潮流求出变化后的传输通道潮流,不必重新求解潮流程序,提高计算效率^[13]。

设传输通道 l 出现重载现象,待选传输通道为 k , k 加入系统后能有效降低 l 的重载功率,其降低量为:

$$\Delta P_{lk} = \beta_{lk} \frac{\Delta B_k}{B_k} P_k \quad (7)$$

其中, ΔB_k 为网络中只有传输通道 k 增加时其电纳变化量; B_k 为传输通道 k 的电纳值; P_k 为流经传输通道的有功功率; β_{lk} 的表达式如式(8)所示。

$$\beta_{lk} = \frac{\delta_{lk} - B_l \chi_{lk}}{1 + \Delta B_k \chi_{kk}}, \quad \delta_{lk} = \begin{cases} 0 & l \neq k \\ 1 & l = k \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\chi_{lk} = \mathbf{e}_l^T \mathbf{X}_k^T$, \mathbf{e}_l 为一列向量,对应起始节点的相应元素为1,对应终止节点的相应元素为-1,其余元素为0, χ_{kk} 与之同理。

考虑传输通道的建设投资成本,定义待选传输通道的有效性指标:

$$\xi_{lk} = \frac{\Delta P_{lk}}{C_k} \quad (9)$$

其中, C_k 为传输通道 k 的建设投资。 ξ_{lk} 越大说明网络解越有效。

2.2 非网络解

在不改变电网的网架结构的前提下,非网络解利用完善的电能监测、控制和管理系统,从常规电源和负荷侧入手采取一系列的管理措施,既降低了电网投资建设成本,又提高了电网对非水可再生能源的消纳能力,主要措施包括:利用电价作为经济杠杆,积极实施错峰手段,引导部分高峰负荷转移至低谷时段;通过调整常规机组出力,在光伏出力时段以就地消纳光伏发电功率为目的,减少功率倒送的发生,提高光伏发电消纳占比。

光伏发电出力的时变性导致传输通道潮流频繁波动、反向,伴有重载甚至阻塞现象。这种不确定因素的变化可利用灵敏度系数来量化,利用量化值找出对传输功率控制效果最好的节点,对其实施有效的非网络解措施,进而保证传输通道畅通,提升消纳能力。

本文定义灵敏度系数 $\eta_{i,a}$, 表示流经传输通道 i 的有功功率受节点 a “源-荷”功率变化的敏感程度,定义式如下:

$$\eta_{i,a} = \frac{dP_i}{dP_a} \quad (10)$$

其中, P_a 为节点 a 的有功功率,由负荷用电功率和光伏发电功率两部分组成,即 $P_a = P_{PV} - P_{load}$; P_i 为流经传输通道的潮流,如图2所示,其中节点 b 为除节点 a 以外的电网系统等值节点。

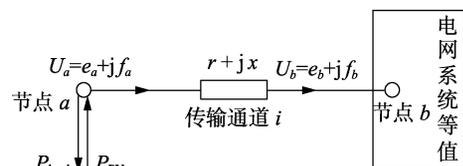


图2 传输通道的潮流示意图

Fig.2 Schematic diagram of power flow of transmission channel

P_i 可由节点 a 和节点 b 的节点电压 U_a 、 U_b 确定:

$$\begin{cases} S_i = U_a (I_{ab})^* \\ U_a = e_a + j f_a \\ I_{ab} = \frac{e_a + j f_a - (e_b + j f_b)}{r + jx} \end{cases} \quad (11)$$

可得:

$$S_i = \frac{1}{r^2 + x^2} (e_a^2 r - e_a e_b r - e_a f_b x + e_b f_a x + f_a^2 r - f_a f_b r) + \frac{j}{r^2 + x^2} (e_a^2 x - e_a e_b x + e_a f_b r - e_b f_a r + f_a^2 x - f_a f_b x) \quad (12)$$

取 S_i 的实部即为有功功率 P_i :

$$P_i = \frac{1}{r^2 + x^2} (e_a^2 r - e_a e_b r - e_a f_b x + e_b f_a x + f_a^2 r - f_a f_b r) \quad (13)$$

根据式 (13) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_i}{\partial e_a} = \frac{1}{r^2 + x^2} (2e_a r - e_b r - f_b x) \\ \frac{\partial P_i}{\partial e_b} = \frac{1}{r^2 + x^2} (-e_a r + f_a x) \\ \frac{\partial P_i}{\partial f_a} = \frac{1}{r^2 + x^2} (e_b x + 2f_a r - f_b r) \\ \frac{\partial P_i}{\partial f_b} = \frac{1}{r^2 + x^2} (-e_a x - f_a r) \end{cases} \quad (14)$$

此时 $\eta_{i,a}$ 为:

$$\eta_{i,a} = \frac{dP_i}{dP_a} = \frac{\partial P_i}{\partial e_a} \frac{de_a}{dP_a} + \frac{\partial P_i}{\partial e_b} \frac{de_b}{dP_a} + \frac{\partial P_i}{\partial f_a} \frac{df_a}{dP_a} + \frac{\partial P_i}{\partial f_b} \frac{df_b}{dP_a} \quad (15)$$

其中, $\frac{de_a}{dP_a}$ 、 $\frac{de_b}{dP_a}$ 、 $\frac{df_a}{dP_a}$ 和 $\frac{df_b}{dP_a}$ 可由潮流计算中雅可比矩阵取逆求得。

2.3 消纳能力提升措施决策模型

网络解和非网络解的决策因素取决于传输通道阻塞二维评定等级,即负载率期望与潮流熵。对于重载且潮流功率波动剧烈的传输通道,必然亟待选择网络解来消除过载引起的安全隐患;对于轻载且潮流功率波动甚微的传输通道,如果出现短时阻塞现象,可以考虑采用非网络解措施。对于重载且功率波动较小的情况,或者轻载但功率波动剧烈的情况,2类提升措施都有一定的作用,在决策时存在一个模糊区间。下文引入了模糊数学理论,对传输通道阻塞二维评定等级进行模糊处理,以便于给出更为合理有效的提升措施。

假设网络解和非网络解的提升措施均能消除传输通道的阻塞问题,决策以经济成本最小为目标,考

虑消纳提升措施存在模糊过渡区间,本文选择偏小型梯形分布中半梯形分布的隶属度函数作为消纳提升措施的决策函数:

$$u_k = \begin{cases} 1 & x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad (16)$$

其中, x 为论域内包含的元素,即传输通道阻塞二维评定等级值; c 为非网络解措施的传输通道阻塞二维评定等级最大值; d 为网络解措施的传输通道阻塞二维评定等级最小值。

隶属度 $u_k \in [0, 1]$, 传输通道阻塞二维评定等级值越大,隶属度越接近于 0,宜采用网络解提升措施,反之宜采用非网络解提升措施, u_k 分布如图 3 所示。

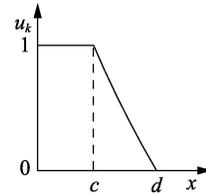


图 3 消纳提升措施决策隶属度函数

Fig.3 Decision-making membership function of accommodation ability promotion

3 消纳能力提升流程及评估指标

传统光伏消纳能力评估一般以一个或几个时间断面进行分析计算得到静态指标,人为选取断面是否合理直接决定了评估结果的准确性。本文采取光伏消纳占比 η 作为光伏消纳评估指标^[14-15],定义式如下:

$$\eta = \frac{E_{PV}}{E_{load}} \times 100\% = \frac{\sum_{t=1}^T P_{PV,t}}{\sum_{t=1}^T P_{load,t}} \times 100\% \quad (17)$$

其中, E_{PV} 为光伏发电消纳电量; E_{load} 为负荷用电量; $P_{PV,t}$ 为光伏消纳发电功率; $P_{load,t}$ 为负荷用电功率。

消纳占比是一个功率随时间不断累积的指标,降低了极端天气情况带来的评估误差,克服了静态指标缺陷,同时也能体现光伏发电的时序性。

消纳能力提升流程如图 4 所示。

4 算例分析

本文采用华东某地区实际电网系统开展消纳能力提升研究,其 500-220 kV 拓扑结构如附录图 A1 所示。地区电网的光伏出力同季节具有一致趋势,晴朗和阴雨天气又呈现出明显差异。因此,结合该

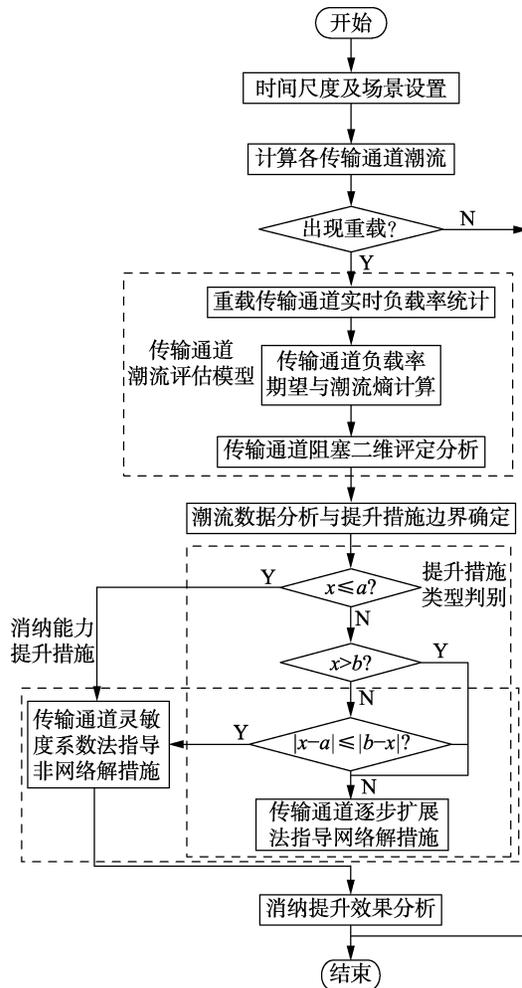


图 4 消纳能力提升流程

Fig.4 Flowchart of accommodation ability promotion

地区 2016 年历史数据,以年为时间尺度,每个季节选取晴、雨 2 种典型场景,按表 4 扩展为 8 760 个时段进行算例研究。

表 4 场景设置

Table 4 Scene setting

季节	晴天		阴雨	
	比例	天数	比例	天数
春季	0.68	61	0.32	29
夏季	0.84	76	0.16	14
秋季	0.78	70	0.22	20
冬季	0.70	63	0.30	27

4.1 传输通道阻塞分析

2016 年该地区的光伏装机容量为 657.6 MW,光伏发电年最大利用小时数为 1 272.33 h,年光伏发电消纳电量为 8.12 亿 kW·h,年负荷用电量为 152 亿 kW·h,年光伏发电消纳占比为 5.32%,弃光率为 3%。

根据潮流数据显示,中午为光伏出力峰值时段,也是光伏发电出现功率倒送致使传输通道过载概率最大的时段。本文以负载率超过 0.8 的重载传输通道作为研究对象,表 5 为整个时间尺度内负载率出

现等于或超过 0.8 的重载传输通道。

表 5 重载传输通道统计

Table 5 Statistics of heavy load transmission channel

对象	重载传输通道名称	额定容量/(MV·A)	重载频率
重载线路	皖金家 220—皖辛东 220	239	0.79
	皖金家 220—皖西山 220	318.7	0.54
	皖古沟 220—皖芦集 220	239	0.04
重载变压器	皖西山 2110—皖西山 B2220	120	0.29
	皖八公 1110—皖八公 B1220	120	0.17
	皖寿州 B1110—皖寿州 B1220	120	0.32
	枸杞变 110—枸杞变 35	50	0.23

重载传输通道的负载率期望与传输通道潮流熵如表 6 所示。

表 6 重载传输通道负载率期望与潮流熵

Table 6 Load rate expectation and power flow entropy of heavy load transmission channel

对象	重载传输通道名称	传输通道负载率期望	传输通道潮流熵
重载线路	皖金家 220—皖辛东 220	0.96	0.62
	皖金家 220—皖西山 220	0.70	0.72
	皖古沟 220—皖芦集 220	0.57	0.33
重载变压器	皖西山 2110—皖西山 B2220	0.79	0.44
	皖八公 1110—皖八公 B1220	0.76	0.44
	皖寿州 B1110—皖寿州 B1220	0.62	0.65
	枸杞变 110—枸杞变 35	0.38	0.62

根据传输通道阻塞的二维评定分析,可以得到淮南电网重载传输通道的二维评定等级结果如表 7 所示。

表 7 重载传输通道阻塞二维评定值

Table 7 Two-dimensional evaluation value of heavy load transmission channel congestion

重载传输通道名称	阻塞二维评定值
皖金家 220—皖辛东 220	12
皖金家 220—皖西山 220	9
皖古沟 220—皖芦集 220	4
皖西山 2110—皖西山 B2220	6
皖八公 1110—皖八公 B1220	6
皖寿州 B1110—皖寿州 B1220	9
枸杞变 110—枸杞变 35	6

4.2 消纳能力提升措施决策

结合该地区 2016 年潮流数据对重载传输通道有如下分析结果:

a. 平衡节点孔店变通过皖金家至皖辛东 220 kV 线路向淮南西南地区进行供电,该输电线路的重载频率高,用电午高峰以及晚高峰出现短时阻塞现象,后半夜为传输线路负载率低谷,但是依旧保持在 0.6 左右;

b. 皖金家至皖西山 220 kV 线路也向淮南西南供电,重载出现在午、晚高峰时段,其余时段负载率稳定在 0.5~0.7;

c. 钱甸火电通过皖古沟至皖芦集 220 kV 线路

向芦集地区供电,重载由夏季最大运行方式下中午时段光伏功率倒送引起,其余时段负载率稳定在 0.6 左右;

d. 淮南中部地区矿区分布较多,由于负荷用电特点,皖西山和皖八公变电站负荷用电高峰出现在后半夜;

e. 淮南西部寿县地区有大量集中式光伏电站,光伏出力远大于负荷用电功率,大量光伏功率倒送导致寿州变出现严重阻塞问题;

f. 枸杞变作为光伏并网升压变电站,负荷功率少,中午时段光伏倒送导致变压器阻塞。

基于以上分析,结合消纳能力提升措施决策模型,本文取 $c=4$ 、 $d=9$ 分别为非网络解和网络解措施的传输通道阻塞二维评定等级最大值与最小值,如图 5 所示。应用网络解的传输通道逐步扩展法和网络解的传输通道灵敏度系数找出最佳提升措施,提升措施类型划分如表 8 所示。

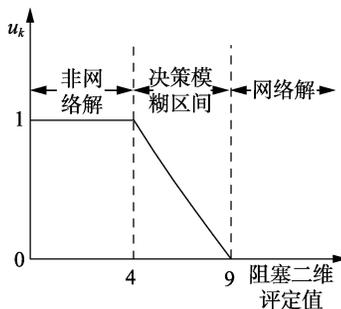


图 5 网络解与非网络解决策
Fig.5 Decision-making of network solution and non-network solution

表 8 提升措施类型划分
Table 8 Classification of promotion measures

重载传输通道名称	阻塞二维评定值	隶属度 u_k	提升措施类型
皖金家 220—皖辛东 220	12	0	网络解
皖金家 220—皖西山 220	9	0	
皖寿州 B1110—皖寿州 B1220	9	0	
皖西山 2110—皖西山 B2220	6	0.6	
皖八公 1110—皖八公 B1220	6	0.6	非网络解
皖古沟 220—皖芦集 220	4	1.0	
枸杞变 110—枸杞变 35	6	0.6	

4.3 效果分析

采用文献[16]火电与可再生能源成本效益分析方法对重载传输通道从网络解和非网络解 2 个层面进行计算,其对比结果如表 9 所示,其中火电标杆上网电价为 0.369 3 元/(kW·h) (含税)、光伏标杆上网电价为 0.85 元/(kW·h) (含税)^[17-18]。

表 9 重载传输通道提升效果与成本分析
Table 9 Promotion effect and cost of heavy load transmission channels

重载传输通道名称	网络解成本/提升效果	非网络解成本/提升效果
皖金家 220—皖辛东 220	1 167/0.101	677/0.037
皖金家 220—皖西山 220	1 592/0.075	621/0.025
皖寿州 B1110—皖寿州 B1220	2 300/0.075	600/0.021
皖西山 2110—皖西山 B2220	2 300/0.053	740/0.050
皖八公 1110—皖八公 B1220	2 300/0.550	745/0.051
皖古沟 220—皖芦集 220	2 248/0.036	663/0.034
枸杞变 110—枸杞变 35	1 200/0.055	740/0.050

注:成本的单位为万元;提升效果为消纳电量的增量,单位为亿 kW·h。

表 9 中前 3 个重载传输通道非网络解提升成本仅为网络解方式的 1/3,虽然网络解初期投资成本较大,但综合考虑全生命周期成本和提升效果,网络解较为合理。后 4 个重载传输通道网络解比非网络解提升效果微高,但投资成本是非网络解的 2~3 倍,这些传输通道建议采用非网络解进行提升。

提升成本与效果分析验证了第 4.2 节中提升措施决策模型的正确性,二维评定等级 $0 \leq x \leq 4$ (隶属度 $u_k = 1$) 采用非网络解措施进行提升,二维评定等级 $x \geq 9$ (隶属度 $u_k = 0$) 采用网络解进行提升,二维评定等级 $4 < x < 9$ 作为决策的模糊区间应用提升效果和成本分析确定提升措施类型。

依据表 9 给出的提升成本和效果分析,结合潮流数据分析,利用 BPA 仿真计算得到表 10 所示消纳能力措施。

通过仿真计算,实施消纳能力提升措施后该地市全年消纳光伏电量为 8.37 亿 kW·h,消纳占比提升至 5.5%,不存在弃光现象且全年传输通道无重载

表 10 重载传输通道提升措施
Table 10 Promotion measures for heavy load transmission channels

重载传输通道名称	提升措施类型	传输通道有效性指标/灵敏度系数(措施控制节点)	提升措施
皖金家 220—皖辛东 220	网络解	0.12(皖金家)	线路扩容采取新增并联同型号线路
皖金家 220—皖西山 220		0.1(皖金家)	线路扩容采取新增并联同型号线路
皖寿州 B1110—皖寿州 B1220		0.08(皖寿州 B1110)	1 号主变从 120 MV·A 扩容至 150 MV·A
皖西山 2110—皖西山 B2220	非网络解	-0.37(皖西山 2110)	皖西山变低压侧负荷时移至中午时段
皖八公 1110—皖八公 B1220		-0.41(皖八公 1110)	皖八公变低压侧负荷时移中午时段
皖古沟 220—皖芦集 220		-0.24(皖钱甸火电)	中午时段压制火电对皖芦集供电
枸杞变 110—枸杞变 35		-0.48(枸杞变 35)	枸杞变低压侧负荷时移中午时段

注:传输通道有效性指标对应网络解,单位为万元/MW;灵敏度系数对应非网络解,其负号表示措施控制节点能降低原重载传输通道潮流。

现象,验证了上述方法和理论的合理性。

5 结语

针对大规模光伏发电功率并网导致传输通道阻塞的问题,本文提出传输通道潮流评估模型,从传输通道的负载率水平高低和功率波动剧烈程度判断传输通道出现阻塞的可能性大小,并根据传输通道阻塞二维评定等级值,采取相应的网络解和非网络解措施。华东某地市电网算例表明,上述方法能准确辨识易发生阻塞的传输通道,并通过实施消纳提升措施有效提高电网对光伏发电的消纳。基于以上研究,得出如下结论:对于长时间处于重载运行且潮流功率波动剧烈的传输通道,需迫切采取逐步扩展法指导网络解对其进行改造,降低出现阻塞的可能性;对于短时出现重载运行且潮流功率波动轻微的传输通道,可采取灵敏度系数法指导非网络解对其进行调度,防止出现阻塞现象;其余情况可根据传输通道的潮流数据分析,应用传输通道潮流评估模型合理确定网络解与非网络解边界值,结合当地电网实际情况提出对应的消纳提升措施。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力发展“十三五”规划[EB/OL]. [2016-11-07]. <http://www.nea.gov.cn>.
- [2] 国家能源局西北监管局. 2016年西北区域新能源并网运行情况通报[EB/OL]. [2017-01-18]. <http://xbj.nea.gov.cn/website/Aastatic/news-176162.html>.
- [3] 闫占新,刘俊勇,许立雄,等. 风能等效转化利用模型及其效益研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):48-54.
YAN Zhanxin, LIU Junyong, XU Lixiong, et al. Investigation on equivalent conversion-utilization models and corresponding benefits for wind energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):48-54.
- [4] 孙盛鹏,刘凤良,薛松. 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):77-83.
SUN Shengpeng, LIU Fengliang, XUE Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demandside resources to renewable energy source integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):77-83.
- [5] 李则衡,陈磊,路晓敏,等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术,2017,41(7):2187-2194.
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2187-2194.
- [6] 陈磊,徐飞,王晓,等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4283-4290.
- [7] 王奇伟,姜飞,马瑞,等. 基于状态转移的风电并网下线路潮流分析[J]. 电网技术,2013,37(7):1880-1886.
WANG Qiwei, JIANG Fei, MA Rui, et al. Power flow analysis of power grid connected with wind farms based on state transition[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1880-1886.
- [8] 苏胜皓,宋锐,陈庆芳,等. 基于序列运算的含分布式发电配电网潮流分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24):12-17.
SU Shenghao, SONG Rui, CHEN Qingfang, et al. Power flow analysis of distribution network containing distributed generation based on sequence operation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24):12-17.
- [9] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰,等. 关于输电阻塞及其管理的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(13):101-107.
PENG Huimin, XUE Yusheng, XU Jianbing, et al. A review of transmission congestion management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13):101-107.
- [10] 丁理杰. 复杂电网连锁故障大停电分析与预防研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
DING Lijie. Research on analysis and preventive control of cascading blackouts in complex power systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [11] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):11-16.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment of power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19):11-16.
- [12] 张继国,辛格. 信息熵——理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012:31-34.
- [13] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京:中国电力出版社,2014:127-130.
- [14] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):1-9.
- [15] MORALES J M, CONEJO A J, PEREZ-RUIZ J. Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):900-910.
- [16] 江岳文,张艺渊. 风火调峰权交易促进风电再次接纳研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):14-21.
JIANG Yuewen, ZHANG Yiyuan. Peak regulation right trading between wind farm and thermal unit for second accommodation of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):14-21.
- [17] 国家发展改革委. 关于调整光伏发电陆上风电标杆上网电价的通知[EB/OL]. [2016-12-26]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201612/t20161228_833065.html.
- [18] 国家发展改革委. 关于降低燃煤发电上网电价和一般工商业用电价格的通知[EB/OL]. [2015-12-27]. http://www.ndrc.gov.cn/zfwz/zfdj/jggg/201512/t20151230_769630.html.

作者简介:



李宏仲

李宏仲(1977—),男,上海人,副教授,博士,主要研究方向为电压稳定控制、电力系统优化运行(E-mail:lh_z_ab@263.net);

高宇男(1992—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为非水可再生能源消纳技术(E-mail:1838766868@qq.com)。

(下转第126页 continued on page 126)

CHEN Hong, GAO Yanbin, SUN Hua, et al. The design and research of fuzzy self-adapted ADRC arithmetic [J]. Control System, 2008, 24(8): 32-33.

[21] SHI Hongmei, SI Wei. Simulation & realization of PMSM servo system based on fuzzy active-disturbance rejection [C] // The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China; IEEE, 2009: 446-451.

[22] 王耀南, 孙炜. 智能控制理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 55-80.

作者简介:



高本锋

高本锋 (1981—), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为高压直流输电和电力系统次同步振荡 (E-mail: gaobenfeng@126.com);

姚 磊 (1992—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统次同步振荡 (E-mail: yaolay2011@126.com)。

Supplementary damping control of SSO based on fuzzy active disturbance rejection control for photovoltaic-thermal-bundled system transmitted by series compensation

GAO Benfeng, YAO Lei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at photovoltaic-thermal-bundled power system, a supplementary damping controller based on fuzzy ADRC (Active Disturbance Rejection Control) is designed to suppress the sub-synchronous resonance caused by series compensation. The oscillation modes of bundled power system are recognized, and the rotation rate deviation obtained by band pass filters is used as input to design supplementary damping controller based on ADRC. Considering the fluctuating and intermittent characteristics of photovoltaic, which makes the operating state complicated, the fuzzy control is used to improve the parameters of ADRC. The simulation example consisting of IEEE SSO (Sub-Synchronous Oscillation) first benchmark model and grid-connected photovoltaic, is constructed based on PSCAD/EMTDC. The results show that the designed multi-channel supplementary damping controller based on fuzzy ADRC can effectively suppress SSO with strong robustness, which has greater advantages than traditional PID controller.

Key words: photovoltaic-thermal-bundled power system; sub-synchronous oscillation; series compensation; active disturbance rejection control; fuzzy control

(上接第 120 页 continued from page 120)

Promotion strategy of photovoltaic accommodation ability for regional power grid

LI Hongzhong¹, GAO Yunan², ZHANG Xueying³, LIN Dong³, QIANG Wei¹, SUN Weiqing⁴

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China; 3. Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Guangzhou 510600, China; 4. Department of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of transmission channel obstruction caused by large-scale photovoltaic power reversal, a power flow evaluation model for transmission channel is proposed. The load rate expectation of transmission channel is adopted to evaluate the load rate level, and the power flow entropy of transmission channel is used to determine the power fluctuation intensity, on this basis, the two-dimensional evaluation level of transmission channel obstruction is adopted to judge the possibility of blocking in the transmission channel. The membership function of fuzzy mathematics is applied to determine the type of accommodation ability promotion measure, and the stepwise expansion method and sensitivity coefficient method are used to guide the implementation of network solution and non-network solution respectively. The validity of the proposed method is verified by an actual power grid in a region.

Key words: photovoltaic power generation; transmission channel obstruction; load rate; power fluctuation; accommodation ability promotion