

## 多端背靠背柔性直流互联系统负载均衡

刘亚南<sup>1</sup>, 徐 研<sup>1</sup>, 韩华春<sup>2</sup>, 吴俊鹏<sup>3</sup>(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网江苏省电力有限公司  
电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:**提出了一种多端背靠背柔性互联系统的负载均衡方法,首先搭建了多端背靠背柔性互联系统模型,定义了动态负载率、负载跟随度等指标,建立了从单馈线到多馈线的负载均衡指标体系,以及负载均衡的多目标评价模型。其次,结合搜索范围大、精度高的改进布谷鸟算法,对多端背靠背柔性互联系统负载均衡方案进行了优化。最后,在 MATLAB 上搭建算例,验证了多端背靠背柔性互联系统进行负载均衡的可行性与有效性,以及使用动态负载率等指标进行评价必要性。

**关键词:**多端背靠背柔性直流输电;改进布谷鸟算法;负载均衡;负载越限

**中图分类号:**TM721.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2018)03-0084-07

## 0 引言

中国社会经济的快速发展,使得资源的需求量剧增,能源短缺、生态恶化等问题也日益突出,提高新能源利用率,实现新能源消纳,已成为全球共同关注的问题<sup>[1-2]</sup>。以风电光伏为代表的随机间歇性新能源的接入会对电网产生较大的冲击,造成馈线负载率的不均匀,如果不对潮流加以调控,就会产生轻载运行经济性差、重载满载运行输电阻塞、负荷越限、节点电压下降等问题,甚至产生联级故障,引发停电事故,严重影响电力系统的安全稳定运行<sup>[3]</sup>。事故资料显示从意大利大停电、英国伦敦大停电,到美加大停电都直接或间接因负荷越限引起电网的解裂,从而扩大事故<sup>[4]</sup>。

背靠背柔性直流输电的提出,让柔性互联的馈线进行负荷的主动分配成为可能,提高了“源-网-荷”一体化的协调优化管理能力,更提高了电力系统的可靠性<sup>[5]</sup>。国内外围绕背靠背柔性直流输电开展了大量的研究工作,包括背靠背柔直系统的控制策略、运行方式、故障处理、与储能结合并网等诸多方面<sup>[6-10]</sup>。背靠背柔直系统在电网负荷的均衡和潮流分配上具有巨大的优势<sup>[11]</sup>,但利用背靠背柔直装置,尤其多端背靠背装置进行潮流控制达到负载均衡的研究少有涉及。多端背靠背柔性直流互联系统(multi-terminal back-to-back, MB2B)进行负载均衡,需要一套负载均衡指标体系作为对馈线状态进行评价和控制的基础。文献[12]侧重从潮流故

障恢复的角度,应用负载均衡度指标,对多条馈线进行负载均衡,但未能注意负载均衡度失准的可能性,指标的使用不够准确。文献[13-14]运用传统负载率指标对风电并网等情况进行了分析,但研究目标集中在背靠背系统拓扑结构和控制策略层面,忽略了负载评价指标在调节过程中的作用。

为进一步优化馈线负载均衡,发挥负载均衡的评价和控制作用,本文首先搭建了共直流母线的多端背靠背柔性互联系统模型,定义了动态负载率、负载跟随度等从单馈线到多馈线的新指标体系;利用改进布谷鸟算法,对馈线负载均衡多目标优化模型进行求解,得到馈线负载均衡评分;将优化前后的结果进行比较,取得了较好的效果,达到预期目标。

## 1 多端背靠背柔性互联系统

本文主要研究多端背靠背柔性互联系统的负载均衡,如图1所示。

多端背靠背柔性互联系统由 $n$ 个背靠背换流器和共用的直流母线构成, $n$ 个背靠背换流器可以接入电网或者电源,其中电源可以是大型集中式传统电源,也可以是分布式电源,或是接入储能系统。系统具有 $m$ 个AC-DC和 $n-m$ 个DC-DC转换模块,配合相应的控制策略,接入电网时,若某条馈线退出运行或出现空载越限,可以根据实际需要,调节各个端口间的交换功率,从而改变通过转换模块相连接的系统的潮流分布,最后体现“柔性”控制这一目标。图1中P1~P4为AC-DC转换模块,P5~P8为DC-DC转换模块。

系统在运行中需要满足的条件如式(1)所示。

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707089);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2017038)

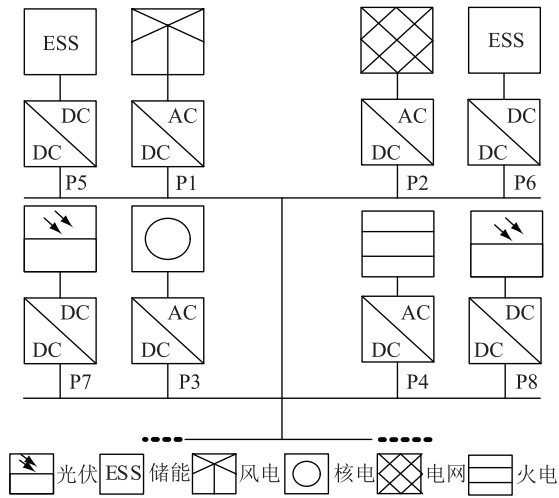


图1 多端背靠背柔性互联系统示意图

Fig.1 Structure of MB2B system

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n P_j(t) = 0 \\ \sqrt{P_i(t)^2 + Q_i(t)^2} \leq S_{imax} \\ i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_i(t)$  为  $t$  时刻变流器  $i$  交流侧的有功功率;  $Q_i(t)$  为  $t$  时刻变流器  $i$  交流侧的无功功率;  $S_i(t)$  为  $t$  时刻变流器  $i$  的容量, 即运行点。

$\sum_{j=1}^n P_j(t) = 0$  表示多端背靠背柔性互联系统中各个背靠背换流器直流侧的输入和输出功率时刻相等, 保持动态的平衡。当某一条馈线的功率输出减少或增加时, 其余馈线总的功率变化也随之变动。AC-DC 端口有功功率与无功功率相互调整, 总在其容量范围内运行。

## 2 负荷均衡评价指标

在既有的研究水平下, 关于负荷均衡的研究多从负载率、负载均衡度等方面作为主要的评价指标。本文提出动态负载率、负载跟随度等新指标, 对多端背靠背柔性互联系统潮流均衡控制功能进行更加系统具体的评价。

### 2.1 负载率和动态负载率

负载率为  $0 \sim T$  一段时间内平均功率和馈线容量的比值<sup>[15]</sup>。负载率在一定程度上反映了馈线容量使用情况, 若馈线的负载率较低, 则表示该馈线输电容量的裕量较大, 投资超前于使用, 能够满足一定阶段的负荷增长和调度需要; 反之, 则需要加强网络投资建设, 增强功率传送能力, 满足负荷增长及事故调度的需要。负载率公式为:

$$R_j(X) = \frac{\overline{P_j(X)}}{P_{jmax}} = \frac{\int_0^X P_j(t) dt}{X} / P_{jmax} \quad (2)$$

当  $X=T$  时:

$$R_j(T) = \frac{\int_0^T P_j(t) dt}{T} / P_{jmax} = \frac{\int_0^T P_j(t) dt}{TP_{jmax}} \quad (3)$$

式(2)为变上限积分函数, 函数自变量为  $X$ , 积分变量为  $t$ 。当函数自变量  $X=T$  时,  $R_j(T)$  表示第  $j$  条支路上的负载率, 如式(3)所示。  $P_{jmax}$  表示第  $j$  条支路可传输的功率最大值。

但负载率没有反映出各条线路的负载实时变化情况。在某一条馈线上, 若发生前后负载率波动较大, 同时出现越限、空载的情况时, 负载率指标亦可能达标, 此失准现象如图2所示。所以负载率这一指标在一定情况下存在漏洞, 包括但不限于上述情况, 不能完全作为单馈线负载均衡的判断指标。相关负载率评价失准而指标达标的情况在第5节进行论述。

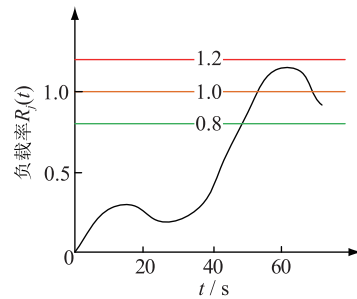


图2 负载率失准示意图

Fig.2 Load rate inaccuracy

本文提出动态负载率的定义, 如式(4)所示。

$$V_j(t) = \frac{P_j(t)}{P_{jmax}} \quad (4)$$

式中:  $V_j(t)$  表示第  $j$  条支路上的动态负载率;  $P_j(t)$  表示第  $j$  条支路上的功率实时值。

根据动态负载率的定义式可知, 在系统正常稳态运行的情况下, 有式(5)恒成立。

$$V_j(t) \leq 1 \quad (5)$$

即功率瞬时值应总小于等于支路可传输的功率最大值。

动态负载率侧重对馈线的实时跟踪, 配合背靠背端口的协调控制, 理想状况下, 可使得馈线时刻保持该时刻最优状态。在考虑负载均衡问题时, 应该在关注负载率的同时兼顾动态负载率的大小, 以免指标失准的发生。

### 2.2 负载均衡度与负载跟随度

负载率、动态负载率用于评价单一馈线的运行

情况,多端背靠背柔性互联系统需要多条馈线的协调运行,以整体上反映出区域电网的馈线负荷均衡水平,所以还需考虑负载均衡度<sup>[16]</sup>这一指标,负载均衡度公式为:

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ R_j(t) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j(t) \right]^2} \quad (6)$$

负载均衡度表示馈线负载分配的均匀程度,对于不同区域的电网比较其负载均衡度可以判断该地区负载分配的合理性。

需要说明的是,不可用负载均衡度对电网直接进行评价,因为负载均衡度的实质是一个标准差,不代表数值的绝对大小只表示一组数据的离散程度,所以评价须结合负载率及动态负载率进行。

负载均衡度的应用,使多条馈线负载分配情况得以评价,但不能避免在负载均衡条件下,出现区域馈线负载率皆低位运行,达不到设计运行要求的情况的发生,使电力基础建设的经济性变差;或者出现区域馈线负载率出现超设计要求的高位运行的情况,使电网存在较大的安全隐患。所以,还应解决实际运行问题和设计要求相关联的指标。

因此,本文还定义了负载跟随度指标,负载跟随度表示负载率对设计负载率的跟随程度。负载跟随度  $D$  其定义为:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [V_j(t) - A]^2} \quad (7)$$

式中: $A$  为馈线建设时的设计目标,即最佳运行标准; $D$  表示负载偏离目标  $A$  的程度, $D$  的值越小,则表示馈线利用靠近设计目标。

负载跟随度的实质为各个馈线负载对于设计负载的标准差。负载跟随度越大,表示馈线使用情况与设计要求相差越大,馈线负载分配不合理,出现低位运行或越限运行的情况,难以达到设计运行要求;负载跟随度越小,表示区域馈线负载分配均匀,利用率接近设计水平。

负载跟随度的设置填补了负载均衡度在馈线低水平运行难以评价的情况,通过控制负载跟随度指标,低水平运行输电经济性差的问题得以解决。

### 3 馈线负载均衡多目标优化模型

在定义一系列负载评价指标后,本文建立了馈线负载均衡多目标优化模型,并利用模型计算得出馈线负载均衡评分  $S$ ,以此对多馈线负载均衡进行更加直观综合的评价。

馈线负载均衡多目标优化模型可以馈线负载率  $R_j$ 、区域负载均衡度  $E$ 、区域负载跟随度  $D$  为规

划方案,考虑运行点约束  $S_{jmax}$ 、动态负载率  $V_j$ 、潮流约束  $\Omega$  等条件进行描述,其中潮流约束  $\Omega$  包括电压、相角、发出的无功、有功、消耗的无功、有功等多个变量,潮流约束由电网电源有功输出范围、电源端电压上下限等诸多方面决定<sup>[17]</sup>。

$$S = F(P_j) = \max[R_j, E^{-1}, D^{-1}] = \max[S] \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n P_j(t) = 0 \quad (9)$$

$$\sqrt{P_i(t)^2 + Q_i(t)^2} \leq S_{imax} \quad (10)$$

$$V_j \leq 1 \quad (11)$$

$$P_j \in \Omega \quad (12)$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

式(8)为目标函数,表示负载率取到最大。负载均衡度、负载跟随度取到最小时,目标函数的最优解为可以使得馈线负载均衡评分  $S$  取得最大值的一组  $P_j$  的值。

式(9)为等式约束,表示多端背靠背柔性互联系统的所有端口输入输出的有功功率应该相等,即  $P_{in} = P_{out}$ 。式(10)为运行点约束,表示多端背靠背柔性互联系统由  $1 \sim i$ ,共  $m$  个背靠背模块组成,每个模块中的变流器交流侧有功功率和无功功率均要满足运行点约束。式(11)为动态负载率约束,多端背靠背柔性互联系统需要大量的馈线连接,以形成网络,对输入输出的潮流进行调控,而  $1 \sim j$  各条馈线负载情况不尽相同,若要达到系统预期的运行额定状况,动态负载率  $V_j$  应在  $0 \sim 1$  之间,即负载率恒正且馈线负载不能越限。式(12)为潮流约束,对于系统的每一个端口,均应满足潮流约束以保证其实际意义,实现所求优化模型从数学解到实际解的转变。

将目标函数的最优解  $P_j$  带入馈线负载均衡评分公式,如式(14)所示,可以得到具体的馈线负载均衡评分值  $S$ 。

$$S = E^{-1} D^{-1} \prod_{j=1}^n R_j = E^{-1} D^{-1} \prod_{j=1}^n \frac{\int_0^X P_j(t) dt}{XP_{jmax}} \quad (14)$$

馈线负载均衡评分  $S$  的大小综合评价区域馈线负载水平,馈线负载均衡的评分越高,则表示区域负载运行情况较好。具体表现在:馈线无越限现象,区域馈线负载分配均匀,利用率接近设计水平等方面。

### 4 改进多目标布谷鸟算法

#### 4.1 多目标布谷鸟算法

本文涉及的多端背靠背柔性互联系统模型具

有馈线多,模型解的个数多等特点,布谷鸟算法具有搜索范围大,精度较高的特点,再因 Levy 飞行机制的作用,可以跳出局部最优解,能较好的迎合模型求解的需要。

布谷鸟算法(CS)<sup>[18]</sup>的基本假设如下:

(1) 布谷鸟一次只产一颗蛋,并且随机寻找寄生巢来孵化;

(2) 在随机选择的寄生巢中,最好的鸟巢将继续用于下一代的比较;

(3) 可利用的寄生鸟巢的数量是一定的,一个寄生巢的主人能发现外来鸟蛋的概率为  $p$ 。

布谷鸟算法的原理:在定义域内随机鸟巢位置  $P_j$ ,并确定该鸟巢的优劣程度  $D_j$ ,将此局部最优的鸟巢保留,并使用 Levy 飞行机制更新所有鸟巢的位置。而后取(0,1)之间服从均匀分布的随机数  $r$ ,令  $r$  与鸟巢被发现的概率  $p$  比较。如果  $r$  大于  $p$ ,那么鸟蛋便被发现,寄生巢的主人抛弃该鸟巢,则随机选取新的鸟巢位置,上述过程称“迁移最差鸟巢位置”,重复这一过程,否则便寻找更优的鸟巢。最后,达到一定的比较次数,最优的鸟巢被找到。

Levy 飞行机制是一种动物寻找食物而随机行走的行进方式,Levy 飞行取决于动物现在所处的位置和走到下一个确定位置的概率,这种长短相间的步长,有利于保证搜索范围的多样性,达到跳出局部最优解的目的。

#### 4.2 改进多目标布谷鸟算法

在基础型布谷鸟优化算法中,Levy 飞行机制的步长长度决定了目标函数的搜索速度,如果步长较小,则搜索速度慢,计算量大;但若步长较大,又不能保证搜索精度,使得算法存在一定的缺陷。自适应 Levy 步长的布谷鸟算法可以通过判断目前鸟巢位置和目前最优位置的关系,自动的调节行进步长,以达到步长的自适应调整,使得算法更加智能、科学。

其调整公式如式(15)所示<sup>[19-20]</sup>。

$$S_a = S_{\min} + \frac{\|X_a - X_b\|}{D_{\max}}(S_{\max} - S_{\min}) \quad (15)$$

式中: $S_{\min}$ 表示行进过程中的最小步长; $S_{\max}$ 表示行进过程中的最大步长; $X_a$ 表示第  $a$  个鸟巢的位置; $X_b$ 表示目前最优的鸟巢的位置; $D_{\max}$ 表示目前最优位置和剩余鸟巢位置的最大距离。

对于负载问题,该算法可以表述为以下步骤:

(1) 定义最大寻找次数  $M$ ,发现概率  $p$ ;

(2) 初始化任意一组负载分配的解  $P_j$ (鸟巢),记录对应的优劣程度即馈线评价系数  $k$ ,设置循环

次数  $t=1$ ;

(3)  $t=t+1$ ,以 Levy 飞行规则更新各负载分配情况下的馈线负载评价系数,随机寻找鸟窝的位置更新公式如式(16),如果新产生的评价系数优于上一代的评价系数,则用此时的一组负载分配情况,替代上一代的最优解;否则用发现概率  $p$ ,丢弃差的解,并使用随机产生的新解,代替丢弃的负载分配情况;

(4) 判断  $t$  是否达到设定值,若未达到则重复进行步骤3;若  $t$  达到设定值,则记录此时最优解,停止计算。

鸟巢位置更新公式如式(16)所示。

$$X_{g+1,c} = X_{g,c} + \partial \oplus L(\beta) \quad (16)$$

式中: $X_{g,c}$ 表示第  $c$  个鸟巢在第  $g$  代的鸟巢位置, $\partial$ 表示步长控制量; $L(\beta)$ 表示 levy 随机搜索路径。布谷鸟算法流程如图3所示。

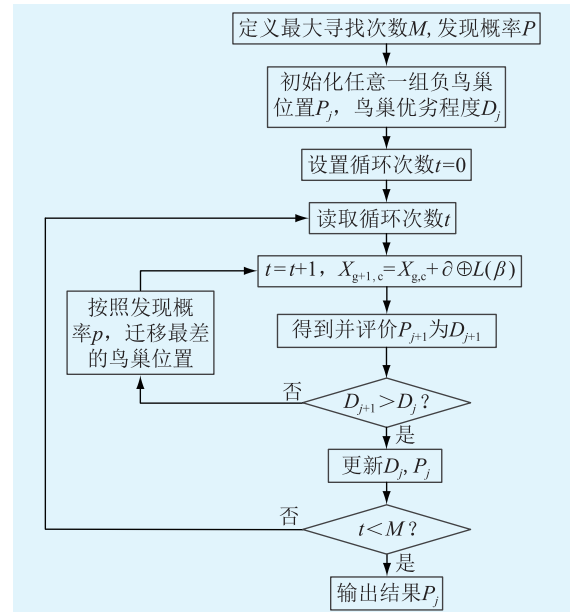


图3 布谷鸟算法流程

Fig.3 Cuckoo algorithm flowchart

## 5 多端背靠背柔性互联系统模型的负载均衡的优化仿真

运用改进多目标布谷鸟算法求解多端背靠背柔性互联系统模型以求取模型最优解  $P_j$ 。

模型描述:为了更加简单直观地反应端口负载情况的变化,仿真系统设置5个背靠背端口,其中端口1,2,3为入口端,用来模拟输入功率,端口4,5为出口端,模拟接入负载,输出功率。端口F1,F2,F3,F4,F5的输入输出功率分别为  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ 。五端口仿真模型如图4所示。设定馈线设计负载率为0.8,在接入多端背靠背柔直系统前,各个馈线参

数如表 1。

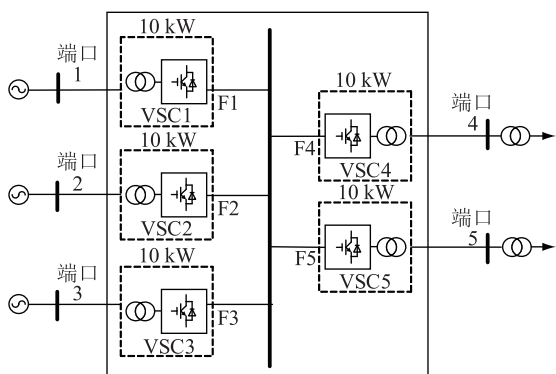


图 4 五端口仿真模型

Fig.4 Five-ports simulation model

表 1 接入系统前的馈线指标

Tab.1 The feeder index before access to the system

馈线	负载率	动态负载率	负载均衡度	负载跟随度	馈线负载均衡评分
F1	1.152	1.122			
F2	0.382	0.391			
F3	0.175	0.193	0.305	0.732	0.407
F4	0.836	0.820			
F5	0.823	0.784			

注:  $t=20\text{ s}$

多端背靠背柔性直流互联系统在第 30 s 时投入运行,各个动态负载率图像如图 5、图 6 所示。

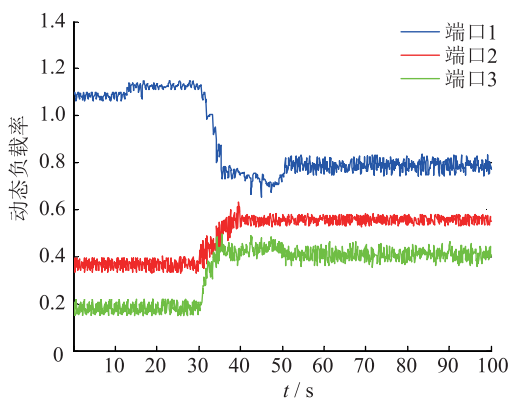


图 5 端口 1,2,3 动态负载率

Fig.5 Dynamic load rate of port 1,2,3

图 5、图 6 中可以看出在仿真开始,而多端背靠背柔性互联系统未投入运行时,馈线 1 的动态负载率处在较高的水平,最高处动态负载率接近 1.2,严重影响系统的安全稳定运行;馈线 2、馈线 3 的动态负载率保持在较低的水平,造成馈线资源的浪费;馈线 4、5 的动态负载率较为平稳,但一直处于重载状态。

在 30 s 以后,多端背靠背柔性互联系统运行,馈线 1 动态负载率渐渐下降,负载转移到馈线 2、馈

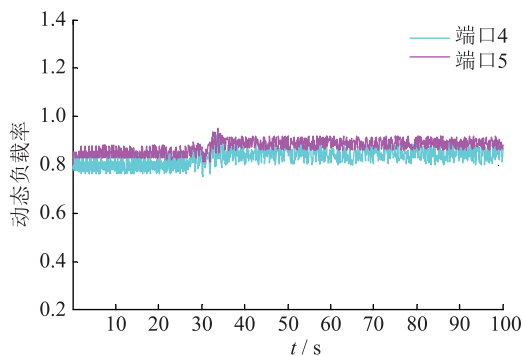


图 6 端口 4 和 5 动态负载率

Fig.6 Dynamic load rate of port 4 and 5

线 3 进行输送,馈线 4 和馈线 5 的动态负载率有一定的上升,稳定在 0.85 和 0.87 的水平;最终系统各条馈线的动态负载率达到求取的最优目标,稳定在较好的水平。接入多端背靠背直流互联系统后的指标如表 2 所示。表中负载均衡度与负载跟随度均得到改善,馈线负载均衡评分明显提升,提升达 430%。

表 2 接入系统后的馈线指标

Tab.2 The feeder index before access to the system

馈线	负载率	动态负载率	负载均衡度	负载跟随度	馈线负载均衡评分
F1	0.969	0.827			
F2	0.485	0.586			
F3	0.376	0.402	0.228	0.249	2.157
F4	0.822	0.847			
F5	0.843	0.866			

注:  $t=20\text{ s}$

将馈线 1 的动态负载率曲线单独进行分析,如图 7 所示。

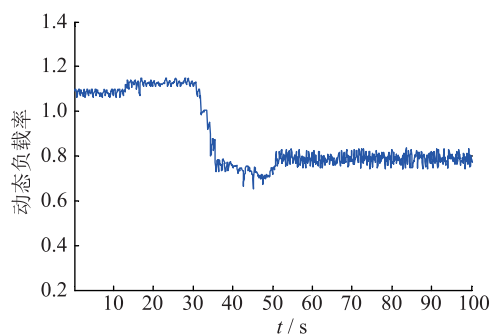


图 7 馈线 1 动态负载率

Fig.7 Dynamic load rate of port 1

经计算,馈线 1 在 0~80 s 的负载率为 0.969,从数值上看馈线 1 负载率良好,但实际上馈线 1 已经越限接近 15%,所以,负载率的使用存在一定的弊端,即不能实时的反应馈线的运行情况,与电网安全运行相悖。

## 6 结语

本文提出使用多端背靠背柔性互联系统进行负载均衡的观点,并建立了多端背靠背柔性互联系统负载均衡一系列指标体系,通过多目标优化,实现电网多馈线的负载均衡。其主要功能包括:(1)通过对动态负载率的控制,消除了越限现象,保证了新能源的安全消纳;(2)保证馈线的容量裕度的同时,以新建立的指标为基础,调度重载线路负荷,进一步提高馈线的利用效率,保证电网运行的可靠和高效。

未来可以结合储能技术的使用,改善均衡效果。本文的研究成果未来可应用于当前新能源接入量较大的高压大容量柔性直流输电系统,调节潮流分布,减少现代能源结构下新能源“弃风、弃光、弃水”现象的持续出现。

### 参考文献:

- [1] 吴金龙,刘欣和,王先为,等.多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J].电网技术,2015,39(6):1593-1599.  
WU Jinlong, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Research of DC voltage hybrid control strategy for VSC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1593-1599.
- [2] 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):1-8.  
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): 1-8.
- [3] 潘智俊,张焱,祝达康,等.计及电网运行非均匀性的多目标输电网络规划[J].电力自动化设备,2014,34(5):53-58.  
PAN Zhijun, ZHANG Yan, ZHU Dakang, et al. Multi-objective transmission network planning considering grid-operational heterogeneity [J]. Dianli Zidonghua Shebei, 2014, 34(5): 53-58.
- [4] 甘德强,胡江溢,韩祯祥.2003年国际若干停电事故思考[J].电力系统自动化,2004,28(3):1-4.  
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continents[J]. Automation of electric power systems, 2004, 28(3): 1-4.
- [5] 王成山,宋关羽,李鹏,等.基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J].电力系统自动化,2017,40(22):168-175.  
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [6] 阳岳希,杨杰,贺之渊,等.基于MMC的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(4):120-124.  
YANG Yuexi, YANG Jie, HE Zhiyuan, et al. Control strategy of MMC based back-to-back HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 120-124.
- [7] 李宁,郝良收,蒋益,等.柔性直流背靠背换流站阀控系统介绍及故障处理[J].广西电力,2017,40(1):21-25.  
LI Ning, HAO Liangshou, JIANG Yi, et al. Introduction of valve control system and fault treatment in VSC-HVDC back-to-back converter station [J]. Guangxi Electric Power, 2017, 40(1): 21-25.
- [8] 刘文军,唐西胜,周龙,等.基于背靠背双PWM变流器的飞轮储能系统并网控制方法研究[J].电工技术学报,2015,30(16):120-127.  
LIU Wenjun, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on grid-connected control method for FESS based onback-to-back converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 120-127.
- [9] 王第成,胡林献,邱迪.电压型直流潮流控制器优化配置方法[J].电力系统自动化,2016,40(21):78-83.  
WANG Dicheng, HU Linxian, QIU Di. Optimal locating method of voltage-type DC power flow controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 78-83.
- [10] 丘文千,丘凌,宁康红,等.电力系统柔性随机生产模拟方法及其应用[J].浙江电力,2016,35(8):1-6.  
QIU Wenqian, QIU Ling, NING Kanghong, et al. Flexible stochastic production simulation method and its application [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(8): 1-6.
- [11] 葛乐,陆文涛,袁晓冬,等.背靠背柔性直流互联的有源配电网合环优化运行[J].电力系统自动化,2017,41(6):135-141.  
GE Le, LU Wentao, YUAN Xiaodong, et al. Back-to-back VSC-HVDC based loop-closed optimal operation for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 135-141.
- [12] 徐建源,李家珏,林莘,等.适应分布式孤岛多裕量运行的功率平衡调控方法[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2031-2038.  
XU Jianyuan, LI Jiajue, LIN Xin, et al. A power balance control method for distributed generation island with multi-margin operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2031-2038.
- [13] 赵越,周飞,宗波,等.环网型混合五端直流输电系统的建模与仿真[J].智能电网,2015,3(1):22-27.  
ZHAO Yue, ZHOU Fei, ZONG Bo, et al. Modeling and simulation of hybrid five-terminal HVDC transmission system [J]. Smart Grid, 2015, 3(1): 22-27.
- [14] 苗璐,林卫星,姚良忠,等.多端口背靠背式直流-直流换流系统[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1023-1031.  
MIAO Lu, LIN Weixing, YAO Liangzhong, et al. Multipoint back-to-back dc-dc converting systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1023-1031.
- [15] 于海波.基于负载率均衡度的电力系统调度策略与风电规划研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
YU Haibo. Research of power system dispatching strategy and

- wind power planning based on load rate balance degree [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [16] 屈刚, 程浩忠, 欧阳武. 考虑线路剩余输电容量的多目标电网规划[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 27-31.
- QU Gang, CHENG Haozhong, OUYANG Wu. A multi-objective power transmission network planning method considering spare capacity of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 27-31.
- [17] 陈珩, 陈怡, 万秋兰, 等. 电力系统稳态分析[M]. 中国电力出版社, 2015.
- CHEN Heng, CHEN Yi, WAN Qiulan, et al. Steady-state analysis of electric power system [M]. China Electric Power Press, 2015.
- [18] 张东寅, 王澎涛, 袁艳斌, 等. 基于改进布谷鸟算法的电力系统最优潮流计算[J]. 水电能源科学, 2017(1): 200-204.
- ZHANG Dongyin, WANG Pengtao, YUAN Yanbin, et al. An-improved cuckoo search algorithm for optimal power flow problem[J]. Water Resources and Power, 2017(1): 200-204.
- [19] 明波, 黄强, 王义民, 等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报, 2015, 46(03): 9-13.
- MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved Cuckoo Search [J]. Shuili Xuebao, 2015, 46(03): 9-13.
- [20] 庄卫金, 王艳, 孙名扬, 等. ±500 kV 多端柔性直流输电系统监视功能设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 38-43.
- ZHUANG Weijin, WANG Yan, SUN Minyang, et al. Monitoring solutions for a ±500 kV multi-terminal VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 38-43.

作者简介:



刘亚南

刘亚南(1988—),男,硕士,从事电力系统继电保护工作(E-mail:lynwyx@163.com);

徐妍(1987—),女,博士,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:eu\_xuyan@163.com);

韩华春(1988—),女,博士,研究方向为新能源并网关键技术研究。

## Load Balancing of Multi-terminal Back-to-back Flexible DC Interconnection System

LIU Yanan<sup>1</sup>, XU Yan<sup>1</sup>, HAN Huachun<sup>2</sup>, WU Junpeng<sup>3</sup>

(1. Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** This paper proposed a load balancing method for a multi-terminal back-to-back flexible interconnection system. Firstly, the flow control model of multi-terminal back-to-back flexible interconnection system is established, and the dynamic load rate, load following degree, feeder load evaluation coefficient and other indexes are defined. The load balancing system from single feeder to multiple feeder is established. Secondly, the improved cuckoo search with large searching range and high precision is optimized for the balanced system solution of multi-terminal back-to-back flexible interconnection system. Finally, an example is given on MATLAB to verify the necessity of dynamic load rate of multi-terminal back-to-back flexible interconnection system, the feasibility and effectiveness of load balancing.

**Key words:** multi-terminal back-to-back flexible DC transmission; improved cuckoo search; load balancing; load limit.

(编辑 钱悦)