

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200470

# 基于粒子群算法的直流系统网架结构优化设计

陈若尘, 张英敏, 刘麒麟, 刘天琪

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 故障电流的抑制问题一直是阻碍柔性直流输电发展的主要因素之一, 故障电流主要受直流线路上的直流潮流影响。然而, 一旦直流系统发生大规模潮流转移, 会对故障电流的抑制造成极大挑战。为了优化直流系统的潮流转移特性, 将潮流分布熵和潮流转移熵作为描述直流系统潮流转移特性的指标。结合经济成本, 加权构建综合指标, 作为粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法的优化目标函数, 以此寻找潮流转移特性最优的直流系统网架结构。通过与其他类型的网架结构的直流系统对比表明, 采用提出的优化方法后, 系统的潮流转移特性得到了明显提高, 同时能够控制经济成本。

**关键词:** 柔性直流输电; 潮流转移特性; 网架结构; 粒子群算法; 层次分析法

## Optimal design of grid structure in a DC system based on a PSO algorithm

CHEN Ruochen, ZHANG Yingmin, LIU Qilin, LIU Tianqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The problem of fault current suppression is one of the main factors hindering the development of flexible high voltage direct current. The fault current is mainly affected by the DC power flow on the DC line. However, once the DC system breaks and leads to large-scale power flow transfer, the fault current suppression will be greatly challenged. In order to optimize the power flow transfer characteristics of a DC system, this paper takes the power flow distribution entropy and power flow transfer entropy as the indices to describe the power flow transfer characteristics of a DC system. Combined with the economic cost, a comprehensive index is constructed by weight as the optimization objective function of a particle swarm optimization algorithm, so as to find the optimal grid structure of the DC system considering the economic cost of power flow transfer characteristics. Compared with other types of grid structure DC systems, the proposed optimization method can improve the power flow transfer characteristics and control the economic cost.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904600).

**Key words:** flexible high voltage direct current; power flow transfer characteristics; grid structure; particle swarm optimization; analytic hierarchy process

## 0 引言

在全球能源互联网的大电网发展背景下, 以可再生能源开发利用为核心, 推动能源结构向清洁、高效转型已经成为各国的共识<sup>[1]</sup>。基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)构成的柔性直流输电网络具有无换相失败风险、有功无功可快速独立解耦控制和输出电压电流谐波含量低等特点, 克服了传统直流输电(LCC-HVDC)的缺陷, 因此被广泛应用于可再生能源并网、建立多端直流

网络系统和弱交流系统并网等场合<sup>[2-3]</sup>, 是未来电网发展的重要方向之一。然而, 由于柔性直流输电地域跨度广、输电距离长、线路周围环境不可控, 与换流站内部设备元件相比, 直流输电线路故障概率更大, 造成的影响和危害更严重<sup>[4-5]</sup>。直流输电线路发生短路故障后, 电容放电和交流系统馈入迅速产生短路电流, 其峰值极大、上升速度极快, 可能在故障发生的几毫秒内对直流系统造成极大损害, 对直流输电线路保护装置提出严峻的挑战。但由于现今尚未研发出适用于直流工程的高压直流断路器, 如何抑制故障电流成为了限制柔性直流输电系统发展的重要因素之一<sup>[6-7]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904600)

根据现有故障电流相关研究表明<sup>[8-10]</sup>：柔性直流系统故障短路电流受换流站出口处直流电压、故障前通过直流线路的稳态电流和直流线路参数影响，前两者综合考虑即为直流线路上的初始潮流。当换流站运行参数确定时，网架结构不同的直流系统，其潮流分布情况也不同，发生断线故障或降端运行时的潮流转移方式也随之改变。因此，设计具有最优潮流转移特性的直流网架结构对故障产生短路电流的控制有重要意义。

相较于换流站快速闭锁，采取故障限流措施是提升直流电网故障穿越能力的更优选择<sup>[11]</sup>。直流系统运行前，需要对各条直流线路设置相对应的限流措施。因此，为了保证限流措施的有效性，直流系统内可能发生潮流转移的规模应尽可能小，对直流系统提出以下两点要求：直流系统内的直流线路发生断线后对系统内其他线路潮流产生的影响小；直流系统内直流线路受到其他线路断线产生的潮流转移的影响小。针对这一问题，直流领域尚无相关研究。但交流领域中的线路脆弱性所描绘的问题与之类似。文献[12]以潮流分布熵为指标，衡量线路断开对系统潮流分布的影响，但未考虑线路本身可能受到潮流转移的影响。文献[13]用潮流转移增量熵衡量线路断开对系统潮流的影响，文献[14]采用有功增加因子体现潮流转移增量，但同样的潮流转移增量对容量不同的线路造成的影响并不同，故潮流转移增量熵并不能合理地描述线路断开对系统潮流的影响。文献[15]将实数信息熵与系统潮流变化特征相结合，构建系统潮流转移均衡度指标，用以衡量潮流增量分配平均程度。但该方法并未考虑潮流转移后线路的潮流大小。文献[16]将线路潮流裕度引入潮流转移熵中，提出计及了线路裕度的潮流转移熵，更突出反映潮流转移量对线路负载率的影响。

本文以文献[17]提出的线路潮流分布熵和潮流转移熵为基础，提出了一种直流系统网架结构优化设计方法。首先定义直流系统的潮流分布熵和潮流转移熵；然后以直流输电线路的工程造价作为经济性指标，通过层次分析法计算三者对应权重，加权得到粒子群算法的最优目标函数；最后在 Matlab 中利用粒子群算法求解当目标函数最小时对应的直流网架结构，该网架结构即为计及经济性的具有最优潮流转移特性的直流网架结构。

## 1 潮流转移特性指标

针对一个采用主从控制策略的直流系统而言，当换流站的运行参数确定时，采用直流潮流计算方法得到直流系统的潮流分布，推导出直流系统的有

功率分布系数矩阵<sup>[18]</sup>，即可得到任意直流线路断开后产生的潮流转移情况。

### 1.1 潮流分布熵

对一个拥有  $n$  条线路的直流系统而言，根据有功分布系数  $D_{k-i}$  可得，当线路  $i$  断开时，线路  $k$  的有功功率增量为

$$\Delta P_{k-i} = -D_{k-i} P_i^{(0)} \quad (1)$$

式中： $P_i^{(0)}$  为线路  $i$  断开前的直流潮流； $D_{k-i}$  为线路  $k$  对线路  $i$  的有功分布系数。

设线路  $k$  的最大传输功率为  $P_{k\max}$ ，则线路  $i$  断开引起潮流转移后，线路  $k$  的负载率为

$$\beta_{k-i} = \left| \frac{P_k^{(0)} - D_{k-i} P_i^{(0)}}{P_{k\max}} \right| \quad (2)$$

设定线路负载率常数序列  $E = [0, e, 2e, \dots, 1]$ ， $q$  为序列内区间数量，此处取  $q=4$ ， $e=25\%$ 。用  $N_{m(i)}$  表示线路  $i$  断开后负载率位于区间  $(me, (m+1)e]$  的线路条数，则网架中线路处于区间  $(me, (m+1)e]$  的概率为

$$P_{m(i)} = \frac{Z_{m(i)}}{n} \quad (3)$$

定义线路  $i$  的潮流分布熵为

$$V_i = -\sum_{m=0}^q \overline{\beta_{m(i)}} P_{m(i)} \ln P_{m(i)} \quad (4)$$

式中， $\overline{\beta_{m(i)}}$  为线路  $i$  断开后，负载率位于  $[me, (m+1)e]$  中所有线路的平均负载率。

定义直流系统的潮流分布熵为

$$V = \frac{\sum V_i}{n} \quad (5)$$

直流系统的潮流分布熵  $V$  越小，说明直流系统内的直流线路断开时产生的潮流转移对直流系统的潮流分布影响越小，直流系统的潮流转移特性更佳。

### 1.2 潮流转移熵

当线路  $i$  断开时，由于潮流转移增量的大小和方向均不确定，对其他线路造成的影响也不同。对稳态时线路  $k$  的功率  $P_k^{(0)}$  和故障后直流系统过渡到新的稳态时线路  $k$  的功率  $P_k^{(1)}$  进行分析可得：

1) 若  $P_k^{(0)}$  和  $P_k^{(1)}$  同向且  $|P_k^{(1)}| > |P_k^{(0)}|$ ，说明此潮流转移增量使线路  $k$  的负载加重，则线路潮流转移量  $\Delta P_{k-i}^{(1)} = |\Delta P_{k-i}|$ 。

2) 若  $P_k^{(0)}$  和  $P_k^{(1)}$  同向且  $|P_k^{(1)}| < |P_k^{(0)}|$ ，说明此潮

流转移增量减轻线路  $k$  的负载, 此时线路潮流转移量  $\Delta P_{k-i}^{(1)} = 0$ 。

3) 若  $P_k^{(0)}$  和  $P_k^{(1)}$  反向且  $|P_k^{(1)}| > |P_k^{(0)}|$ , 说明此潮流转移增量使线路  $k$  的潮流方向翻转, 且负载有所增加, 此时线路潮流转移量  $\Delta P_{k-i}^{(1)} = |P_k^{(1)}| - |P_k^{(0)}|$ 。

4) 若  $P_k^{(0)}$  和  $P_k^{(1)}$  反向且  $|P_k^{(1)}| < |P_k^{(0)}|$ , 说明此潮流转移增量使线路  $k$  的潮流方向翻转, 但方向翻转后负载水平有所降低, 则线路潮流转移量  $\Delta P_{k-i}^{(1)} = 0$ 。

直流系统内线路的潮流转移总量为

$$\Delta P_{(i)} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \Delta P_{k-i}^{(1)} \quad (6)$$

线路  $k$  承担的潮流转移占系统的总潮流转移的比例为

$$\eta_{k-i} = \Delta P_{k-i}^{(1)} / \Delta P_{(i)} \quad (7)$$

对直流系统内所有直流线路(不包括线路  $k$ )分别进行模拟断开, 得到线路  $k$  的潮流转移熵为

$$H_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n -\beta_{k-i} \eta_{k-i} \ln \eta_{k-i} \quad (8)$$

应当考虑的是, 对稳态时负载率不同的线路, 所要求的抗潮流转移冲击的能力是不同的。为了突出反映重载线路的潮流转移熵, 以稳态时线路的负载率为权重, 对线路的潮流转移熵加权求和得到以下结果。

稳态时, 各线路的负载率为

$$\beta_i^{(0)} = \frac{|P_i^{(0)}|}{P_{\max}} \quad (9)$$

定义直流系统的潮流转移熵为

$$H = \sum_{i=1}^n \left( \beta_i^{(0)} / \sum_{i=1}^n \beta_i^{(0)} \right) H_i \quad (10)$$

经过加权后得到的直流系统的潮流转移熵, 反映了直流系统内发生断线故障后对直流系统运行状态的扰动程度, 潮流转移熵越大, 说明直流系统内部分线路可能因断线而产生潮流越限的情况。以线路负载率为权重对潮流转移熵进行加权处理, 突出反映重载线路, 避免“遮蔽”现象的产生。

## 2 构建粒子群算法目标函数

### 2.1 柔性直流输电工程经济指标

柔性直流输电工程的成本主要由换流站成本和直流输电线路费用决定<sup>[19]</sup>。系统运行电压等级和换流站端数确定后, 换流站成本随之固定。直流系统

网架结构不同时, 所需铺设的输电线路长度也不同, 进而影响直流输电工程的成本。定义直流输电系统的经济指标为

$$E = \frac{PL}{E_{av}} \quad (11)$$

式中:  $P$  为直流线路每公里造价;  $L$  为直流输电系统内直流线路总长度;  $E_{av}$  为基准造价。

显然如果直流系统冗余程度足够高, 该系统就不存在潮流转移的问题, 但经济成本也是实际工程建设过程中需要考虑的问题之一, 故引入基准造价  $E_{av}$ 。基准造价反映经济成本在柔性直流输电工程建设过程中的重要程度, 基准造价越高, 表示经济成本在工程建设过程中被考虑的优先级越低, 在工程设计过程中, 设计人员更重视系统的潮流转移特性而不是经济成本。

### 2.2 层次分析法

层次分析法是一种层次权重决策方法。本文将层次分析法应用于主观权重的计算中。按照直流电网规划运行的场景, 对各指标的重要性进行排序。例如, 直流系统的潮流转移熵比直流系统的潮流分布熵更重要, 直流系统的潮流分布熵比直流系统经济成本更重要。根据标度值的定义(表 1), 判断相邻指标的标度值  $q_i$ , 得到指标间的标度值。判断矩阵  $B$  如式(12)所示。

表 1 标度值含义

Table 1 Meaning of scale values

标度值	含义
1.0	同等重要
1.2	稍微重要
1.4	较强重要
1.6	明显重要
1.8	极端重要

$$B = \begin{bmatrix} 1 & q_1 & q_1 q_2 & \cdots & \prod_{i=1}^{n-1} q_i \\ 1/q_1 & 1 & q_2 & \cdots & \prod_{i=2}^{n-1} q_i \\ 1/q_1 q_2 & 1/q_2 & 1 & \cdots & \prod_{i=3}^{n-1} q_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\prod_{i=1}^{n-1} q_i & 1/\prod_{i=2}^{n-1} q_i & 1/\prod_{i=3}^{n-1} q_i & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $q_1$  表示指标 1 相对指标 2 的标度值;  $q_2$  表示指标 2 相对指标 3 的标度值, 以此类推。

根据判断矩阵确定各指标对应权重如式(13)所示。

$$\alpha_i = \frac{\left( \prod_{j=1}^n B_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n B_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (13)$$

得到各指标对应权重后,需要进行一致性检验。一致性比率  $CR$  如式(14)所示。

$$\begin{cases} CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ CR = \frac{CI}{RI} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵  $B$  特征根最大值;  $n$  为指标数量;  $CI$  为判断矩阵的一般一致性指标;  $RI$  为判断矩阵的随机一致性指标,可查表获得。

若一致性比率  $CR < 0.1$ , 则通过检验, 否则需要重新建立判断矩阵。

### 2.3 目标函数

规划柔性直流工程时, 首先要保证直流系统运行的安全性。对故障电流的抑制从这一方面保证了系统运行的安全性, 也就是要优先考虑直流系统的潮流转移特性的优化。因此, 各指标按重要程度从大到小排序为: 潮流转移熵、潮流分布熵和经济成本, 标度值  $q_1 = 1.2$ ,  $q_2 = 1.4$ , 代入式(12)和式(13)得

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.4118 \\ \alpha_2 = 0.3431 \\ \alpha_3 = 0.245 \end{cases} \quad (15)$$

经过检验, 构造的判断矩阵满足一致性检验, 故构建粒子群算法的最优目标函数为

$$Index = 0.4118H + 0.3431V + 0.245E \quad (16)$$

## 3 粒子群优化数学模型

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种模仿鸟群觅食的启发式算法, 一群鸟在随机搜索食物, 如果这个区域只有一块食物, 那么找到这块食物的最优策略就是在目前离这块食物距离最近的鸟的周围搜索, 每一个粒子都追随当前的最优粒子在空间中搜索。

若一个种群中有  $m$  个粒子, 每个粒子有  $n$  维变量。在  $k$  次迭代过程中, 第  $i$  个粒子的位置和速度为  $X_i^k = [x_{i,1}^k, x_{i,2}^k, \dots, x_{i,n}^k]$  和  $V_i^k = [v_{i,1}^k, v_{i,2}^k, \dots, v_{i,n}^k]$ , 通过适应度值获得个体最优值  $P_i^k = [p_{i,1}^k, p_{i,2}^k, \dots, p_{i,n}^k]$  和种群最优值  $G_i^k = [g_{i,1}^k, g_{i,2}^k, \dots, g_{i,n}^k]$ 。在寻找到这两

个最优值后, 粒子根据式(17)更新自己的速度和位置。

$$\begin{cases} v_{i,j}^{k+1} = \omega \cdot v_{i,j}^k + c_1 r_1 \cdot (p_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + \\ \quad c_2 r_2 \cdot (g_{i,j}^k - x_{i,j}^k) \quad j = 0, 1, \dots, n \\ x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子, 一般  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数;  $\omega$  为惯性权重, 用于平衡粒子局部寻优和全局寻优的能力。

一个拥有  $n$  个换流站的柔性直流系统, 换流站编号为换流站 1、换流站 2、...、换流站  $n$ 。对每个换流站而言, 可以用  $1 \times (n-1)$  维的二进制向量来表示该换流站与其他换流站之间的连接关系。第  $n$  个换流站的连接关系则由前  $n-1$  个换流站确定, 故可以得到一个  $(n-1) \times (n-1)$  维的二进制矩阵  $A$  来描绘直流系统的网架结构, 该矩阵有如下性质:

$$A(i, k) = 0, 1 \leq k < i \leq n-1 \quad (18)$$

显然, 矩阵  $A$  是上三角矩阵, 对上三角元素  $A(i, k)$ , 若  $A(i, k) = 1$ , 表示第  $i$ 、 $k$  个换流站之间通过直流线路连接; 若  $A(i, k) = 0$ , 表示第  $i$ 、 $k$  个换流站之间无连接。显然, 在粒子群算法初始化粒子时, 第  $i$  个粒子的取值范围为  $[0, 2^{n-i} - 1]$ 。

运行粒子群优化算法得到最优值, 得到对应的直流系统网架结构, 对该直流系统进行  $N-1$  校验, 若出现直流线路有功功率越限的情况, 说明该直流系统不符合安全运行的需求。故应当调整直流线路基准造价  $E_{av}$ , 降低经济因素在目标函数所占比例, 优先考虑直流系统的潮流转移特性, 重新对最优值进行求解。

综上, 旨在提升直流系统潮流转移特性的网架结构粒子群优化算法如图 1 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 网架优化算例

本文优化对象为  $\pm 400$  kV 柔性直流系统, 系统结构如图 1 所示。该直流系统由五个换流站、五个交流系统和一个直流变压器组成, 采用主从控制策略。每个换流站均与交流系统相连, 直流系统通过直流变压器连接  $\pm 320$  kV 柔性直流系统。直流变压器采用面对面结构(先逆变再整流), 本侧采用定功率控制, 对侧采用孤岛控制。直流输电线路等效电阻为  $1.11 \Omega/100$  km, 线路最大容量为 1 760 MW。以功率注入直流电网为正方向, 直流系统中各换流站和直流变压器控制策略如表 2 所示。

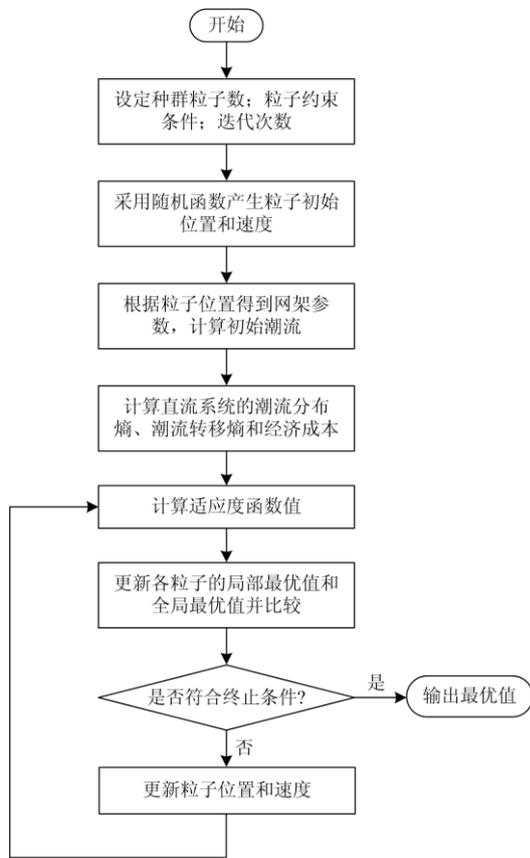


图1 粒子群优化算法流程图

Fig. 1 Flow chart of particle swarm optimization

表2 换流站和直流变压器控制策略

Table 2 Control strategies of converters and DC/DC transformer

换流站	控制策略	参考值
MMC1	定功率控制	2 100 MW
MMC2	定功率控制	600 MW
MMC3	定功率控制	500 MW
MMC4	定功率控制	-1 500 MW
MMC5	定电压控制	±400 kV
直流变压器		
直流变压器	控制策略	参考值
DC-DC1	定功率控制	-400 MW

直流变压器本侧采用定功率控制, 传输功率基本不变, 在优化算法中直流变压器可等效为定功率控制的换流站, 传输功率为-400 MW。根据已有直流输电工程造价<sup>[20]</sup>可得, ±400 kV 柔性直流输电系统输电线路造价约每公里 112 万元,  $E_{av}$  取 15 亿元。

针对图 2 所示柔性直流系统, 待优化的换流站/直流变压器设为: MMC1、MMC2、MMC3、DC-DC1 和 MMC4。粒子群优化算法相关参数设定如下: 初始粒子数为 24, 待优化的粒子维数为 5; 粒

子约束条件矩阵为 $[0,31;0,15;0,7;0,3;0,1]$ ; 粒子最大速度取粒子运动范围的 40%; 学习因子  $c_1=c_2=2$ ; 迭代精度为  $10^{-5}$ , 当连续 25 次迭代中函数梯度仍没有变化时, 则退出迭代。

图 3 所示的运行结果反映了粒子群算法目标函数收敛于 1.095 1, 最优粒子向下取整为 $[19;10;6;2;1]$ , 得到描述直流系统换流站之间连接关系的二进制矩阵为

$$\begin{bmatrix} 19 \\ 10 \\ 6 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{MMC1} \\ \text{MMC2} \\ \text{MMC3} \\ \text{DC-DC1} \\ \text{MMC4} \end{matrix} \quad (19)$$

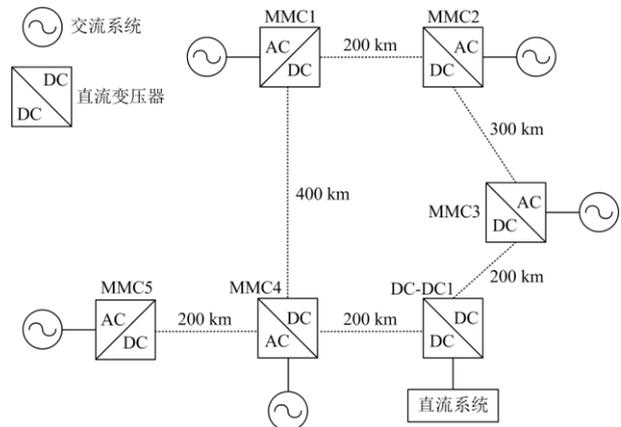


图2 柔性直流系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of MMC-HVDC system

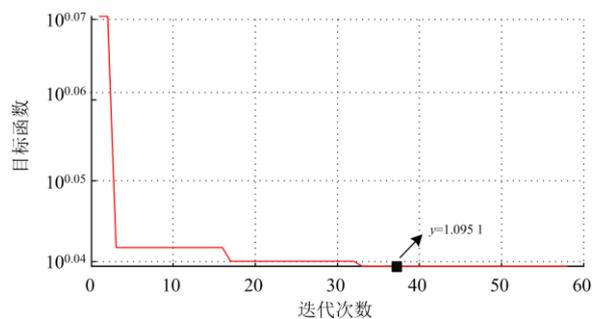


图3 粒子群算法运行结果

Fig. 3 Result of particle swarm optimization

根据矩阵  $\mathbf{B}$  得到计及经济性的具有最优潮流转移特性的柔性直流系统网架结构如图 4 所示。经检验, 当该直流系统内发生  $N-1$  故障时, 直流系统内所有直流线路的有功功率均不超过功率上限, 直流系统运行在安全范围内, 系统能够平稳地过渡到下一个稳态。

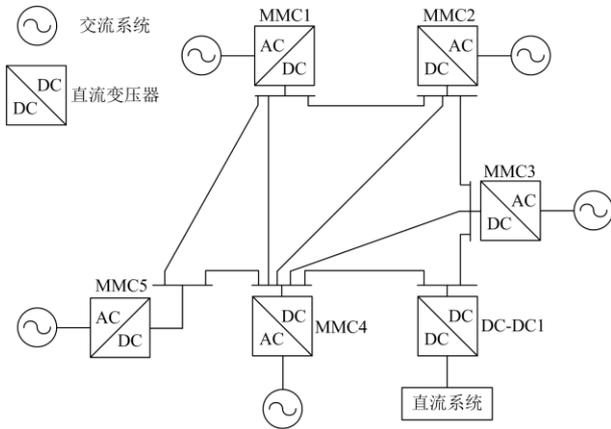


图4 优化后的直流系统网架结构  
Fig. 4 Optimized MMC-HVDC system grid structure

4.2 对比分析

现有研究和示范工程表明，直流系统网架拓扑可分为环型、星型和复杂网孔型<sup>[21-23]</sup>，图5表示以图2中换流站为基础构建的环型、星型、复杂网孔型和图4所示优化后的拓扑，下文对四种不同网架结构的直流系统潮流转移特性进行对比分析。

根据《电力系统安全稳定导则》规定：任意一个元件无故障断开，能保持电力系统的稳定运行，即电力系统要保证  $N-1$  稳定。显然，图5(b)所示星型拓扑的直流系统中任意一条线路断开时，必然会有一换流站与系统脱离，导致直流系统内功率缺额或过剩，从而影响到换流站所连交流系统的频率，故星型拓扑不适用于未来直流电网。观察表3数据发现，直流系统采用图5(a)所示环型拓扑时，系统内不存在冗余结构，其潮流转移熵  $H$  过高，当系统

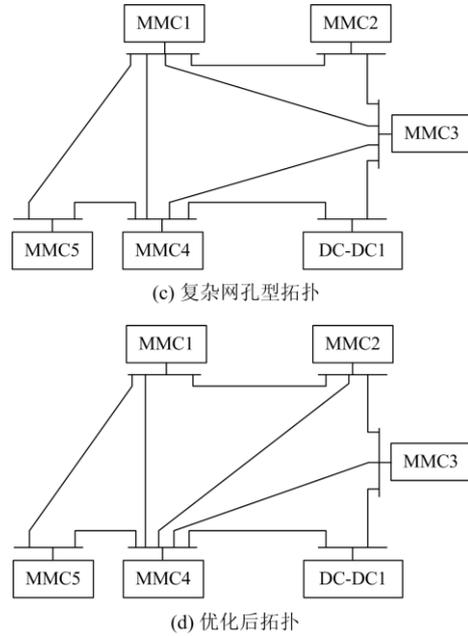


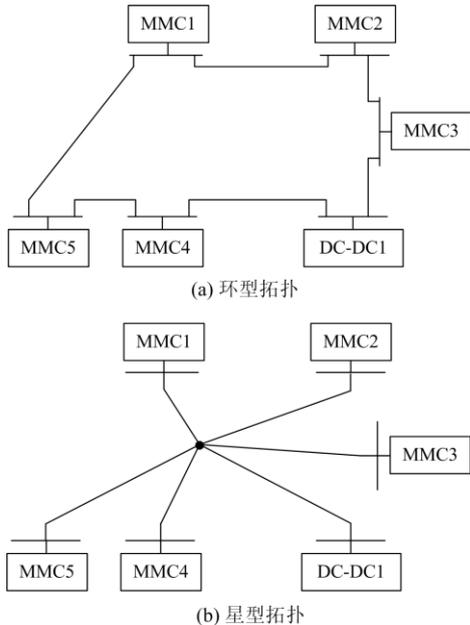
图5 四种不同拓扑的直流系统  
Fig. 5 Four DC systems with different topologies

内发生断线时，原本通过该线路的潮流被完整的分配到其余各线路中去，对其他线路的负载率造成很大影响，例如当线路 MMC1-MMC2 断线时，换流站 MMC1 的功率仅能通过线路 MMC1-MMC3 送出，而换流站 MMC1 额定功率高达 2 100 MW，导致线路 MMC1-MMC3 过载，有可能发生连锁故障，危害到直流系统的安全稳定运行。

表3 各个直流系统的潮流转移特性

拓扑类型	潮流转移熵 $H$	潮流分布熵 $V$	经济成本 $E$
环型拓扑	2.453 3	0.621 9	1.154 3
复杂网孔型拓扑	1.314 2	0.367 1	2.054 1
优化后拓扑	1.162 7	0.321 9	2.064 5

从图6各个拓扑的直流线路潮流转移特性可以看出，总体来说，环型拓扑直流线路的潮流转移特性最差，其次是图5(c)所示复杂网孔型拓扑，采用本文方法优化后的直流线路潮流转移特性最优。对比表3数据，虽然环型拓扑经济成本仅为其余两种拓扑的一半，但其潮流转移特性十分恶劣，不满足电力系统安全稳定运行的需求。采用本文方法优化后拓扑的经济成本与复杂网孔型拓扑近乎相同，但是其潮流转移熵  $H$  和潮流分布熵  $V$  却降低了 11.53% 和 12.31%，潮流转移特性整体变优，可以看出采用本文方法优化后的拓扑在潮流转移特性方面的优越性。



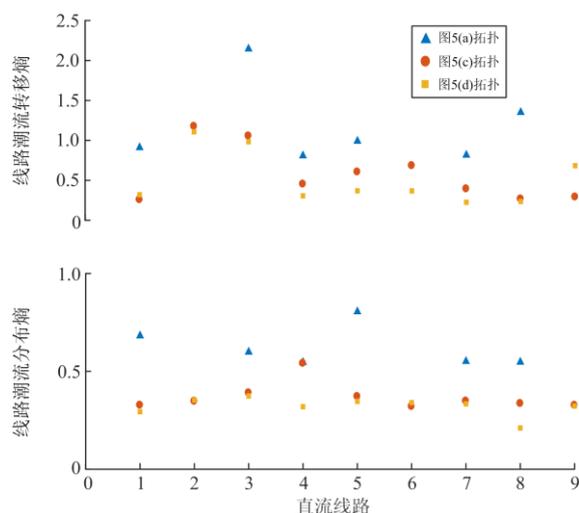


图 6 各个拓扑直流线路的潮流转移特性对比

Fig. 6 Comparison of power flow transfer characteristics of DC lines with different topologies

## 5 结论

为了提升柔性直流系统的潮流转移特性, 从而更好地进行故障电流的抑制, 本文应用粒子群算法对直流系统网架结构进行优化, 得出以下结论:

1) 直流系统潮流分布熵反映了直流系统内线路断线造成的潮流转移对系统本身影响大小, 潮流转移熵反映了直流系统内直流线路抵抗断线造成潮流转移冲击的能力大小, 二者综合可反映直流系统的潮流转移特性。

2) 以直流输电线路工程造价作为直流系统网架结构变化时经济成本的变化因素, 结合潮流分布熵和潮流转移熵得到优化目标函数, 采用粒子群算法对网架结构进行优化。结果显示, 与其他类型的网架结构的直流系统相比, 采用优化后网架结构的直流系统不仅控制了经济成本, 同时在潮流转移特性方面有显著优势。

## 参考文献

[1] 邱晓燕, 沙熠, 宁雪姣, 等. 大规模风电接入的智能电网多类型柔性负荷分级优化调度[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2084-2091.  
 QIU Xiaoyan, SHA Yi, NING Xuejiao, et al. Hierarchical optimization of multi-type flexible load in smart grid with large-scale wind generation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2084-2091.

[2] 李勇, 时伯年, 谢俊, 等. 渝鄂柔性直流工程接入对 500 kV 交流线路差动保护影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 149-155.  
 LI Yong, SHI Bonian, XIE Jun, et al. Influence study of

Chongqing-Hubei VSC-HVDC interconnection on 500 kV AC line differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 149-155.

[3] 唐晓骏, 张正卫, 韩民晓, 等. 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 63-70.  
 TANG Xiaojun, ZHANG Zhengwei, HAN Minxiao, et al. VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 63-70.

[4] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96. DOI: 10.1186/s41601-020-0152-2.

[5] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.  
 XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.

[6] HADJIKYPRIS M, TERZIA V. Transient fault studies in a multi-terminal VSC-HVDC grid utilizing protection means through DC circuit breakers[C] // IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-6.

[7] AKHMATOV V, CALLAVIK M, FRAKNCK C M. Technical guidelines and prestandardization work for first HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 327-355.

[8] BUCHER M K, FRANCK C M. Analytic approximation of fault current contribution from AC networks to MTDC networks during pole-to-ground faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 20-27.

[9] 李俊松, 张英敏, 曾琦, 等. MMC-MTDC 系统单极接地故障电流计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 213-222.  
 LI Junsong, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. Pole-to-ground fault current calculation method of MMC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 213-222.

[10] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.  
 YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.

[11] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关

- 键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.
- LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.
- [12] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 76-82.
- CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 76-82.
- [13] 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 in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 11-16.
- [14] 任建文, 魏俊姣. 电力系统脆弱线路的识别及其输电断面搜索[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 37-42.
- REN Jianwen, WEI Junjiao. Vulnerable line identification and its transmission section search for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 37-42.
- [15] 靳冰洁, 张步涵, 王珂. 基于熵理论的电力系统最优潮流均衡度分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 80-86.
- JIN Bingjie, ZHANG Buhuan, WANG Ke. Entropy theory based optimal power flow balancing analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 80-86.
- [16] 曾珂, 李华强, 曾梦婕, 等. 考虑改进潮流转移熵的电力系统融冰预防控制[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 582-586.
- ZENG Ke, LI Huaqiang, ZENG Mengjie, et al. Power system ice-melting preventive control considering improved transfer entropy of power flow[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 582-586.
- [17] 徐岩, 郅静. 基于加权潮流熵的电网故障传播脆弱线路识别[J]. 现代电力, 2016, 33(3): 88-94.
- XU Yan, ZHI Jing. Identification of vulnerable lines for fault propagation in power grid based on the weighted power flow entropy[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(3): 88-94.
- [18] 陈浩, 张英敏, 曾琦, 等. 真双极 MMC-HVDC 系统线路过载紧急控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 107-114.
- CHEN Hao, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. An emergency control strategy for line overload in bipolar MMC-HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 107-114.
- [19] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 98-102.
- ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Economy comparison of VSC-HVDC with different voltage levels[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 98-102.
- [20] 梁涵卿, 张文亮, 梁旭明. 特高压直流输电导线经济截面选择研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 114-119, 14.
- LIANG Hanqing, ZHANG Wenliang, LIANG Xuming. Research on economic optimization of section areas of conductors of UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 114-119, 14.
- [21] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
- LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [22] KONTOS E, PINTO R T, RODREGUES S, et al. Impact of HVDC transmission system topology on multiterminal DC network faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 844-851.
- [23] BUCHER M K, WIGET R, ANDERSSON G, et al. Multiterminal HVDC networks—what is the preferred topology?[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 406-413.

收稿日期: 2020-04-28; 修回日期: 2020-06-09

作者简介:

陈若尘(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电; E-mail: 94221999@qq.com

张英敏(1974—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, 直流输电; E-mail: zhangyingmin@scu.edu.cn

刘麒麟(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电。E-mail: 906112141@qq.com

(编辑 周金梅)