

DOI: 10.7667/PSPC151175

# 基于改进遗传算法的交直流系统低压减载优化策略

游金阔<sup>1</sup>, 黄霆<sup>2</sup>, 黄道姗<sup>2</sup>, 蔡振才<sup>2</sup>, 李海坤<sup>3</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007; 2. 北京清软创新科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 随着高压直流输电系统不断增多, 大规模交直流混联电力系统逐渐成为我国电网输电的基本形式, 对分析其稳定特性以及优化其控制方法也提出了新的要求。提出了以静态电压稳定性指标为约束的交直流混合系统低压减载优化策略。首先基于交替迭代法计算系统潮流, 建立了适用于交直流输电的静态电压稳定性指标。其次基于改进遗传算法, 以低压减载损失成本最小为目标函数, 求解最优切负荷配置策略。最后仿真结果表明, 新算法可以优化控制策略, 维持系统稳定, 减少损失成本。

**关键词:** 交直流混联; 静态电压稳定指标; 低压减载; 交替迭代法; 改进遗传算法; 损失成本

## Under-voltage load shedding optimization allocation for AC/DC hybrid system based on genetic algorithm

YOU Jinkuo<sup>1</sup>, HUANG Ting<sup>2</sup>, HUANG Daoshan<sup>2</sup>, CAI Zhencai<sup>2</sup>, LI Haikun<sup>3</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350007, China; 3. Beijing Tsingsoft Innovation Technology Company Limited, Beijing 100085, China)

**Abstract:** With the increasing of the HVDC system, large-scale AC/DC hybrid power system gradually becomes the basic form of Chinese power grid transmission. It also puts forward new requirements to analyze the stability and optimize the control method. This paper presents an optimized scheme of the under-voltage load shedding for AC/DC hybrid systems with static voltage stability index as constraint. Firstly, the static voltage stability index of AC/DC transmission is established based on the alternating current iteration method. Secondly, in order to make the load loss minimized, the optimal load allocation strategy is solved based on the improved genetic algorithm. The simulation results show that the new algorithm can optimize the control strategy, maintain the stability of the system, and reduce the loss cost.

**Key words:** AC/DC hybrid; static voltage stability index; under-voltage load shedding; alternating iteration method; improved genetic algorithm; loss cost

## 0 引言

高压直流输电(HVDC)具有输送容量大、功率调节迅速灵活、损耗小、非同步联络能力强等优势, 在远距离大容量输电、大区域电网互联以及跨海峡送电等方面得到了十分广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。同时由于新型电力电子器件的发展支持, 传统的纯交流电网逐渐向交直流互联电网形式转变。但是交直流混合输电系统也给电网的运行和安全带来新的问题: 由于直流换流器消耗大量无功功率(为直流有功功率的40%~60%)的影响, 交直流混联系统电压稳定性问题较纯交流系统更为突出<sup>[3-4]</sup>。

电压稳定性是指电力系统在给定初始条件下, 受扰动后维持电压的能力<sup>[5]</sup>。用电高峰期以及突增大负载等条件的影 响, 将会导致系统节点电压下降甚至系统失稳。目前针对电压稳定性研究多在纯交流系统, 大体分为静态稳定和动态稳定两类, 将其直接推广到交直流系统, 则因直流变量过多及其控制方式转变等因素的影响, 导致结果可靠性差的问题亟待解决。

现有针对交直流系统电压稳定分析的方法主要有短路比法、电压稳定因子法、崩溃点法、连续潮流法、时域仿真法等<sup>[6]</sup>。文献[7]用交流系统短路容量与直流换流器额定功率之比的大小衡量交流系

统带载能力的强弱, 计算效率高, 原理简单, 但忽略了无功功率等参数和直流控制方式等的影响。文献[8]采用直接计算系统临界点的崩溃点法, 可靠性大大提高, 但计算量大, 在电压临界点往往收敛困难。

本文针对以上问题, 提出了一种基于改进遗传算法以综合实用电压稳定指标为约束的交直流系统减载量优化算法。该算法基于负荷重要等级分类, 以最小减载损失成本为目标函数, 并综合考虑交直流混联系统变量可行性约束和直流系统控制方式的转换等因素的影响。

## 1 交直流混合输电系统稳态模型

### 1.1 换流器稳态数学模型

交直流系统模型如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

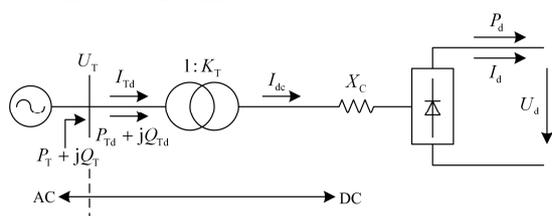


图 1 交直流系统  
Fig. 1 AC/DC system

图 1 中, 换流器的稳态模型方程为<sup>[6,10]</sup>

$$\begin{cases} U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_T K_T U_T \\ U_d = U_{d0} \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} n_T X_C I_d \\ \cos \varphi = \frac{U_d}{U_{d0}} \\ P_d = U_d I_d \\ Q_d = P_d \tan \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{d0}$  表示直流侧空载电压;  $n_T$  为换流桥数, 本文中都认为  $n_T=1$ ;  $K_T$  是换流变压器电压比;  $U_T$  是换流变一次侧交流线电压;  $U_d$ 、 $I_d$  为直流电压和直流电流;  $\theta_d$  为换流器控制角;  $X_C$  为换流变等效电抗;  $\varphi$  表示换流器的功率因数角;  $P_d$ 、 $Q_d$  分别是直流侧有功功率和交流侧吸收的无功功率。

### 1.2 交直流潮流计算

本文采用交替迭代法计算交直流系统潮流, 即将直流系统换流站等效成接在相应交流节点上的 PQ 负荷; 求解直流系统方程组时, 将交流系统等效成加在换流站交流母线上的恒定电压<sup>[11]</sup>。交直流系统潮流交替求解法实现简便, 当系统新增直流支路时, 仅需修改原程序的直流系统网络方程并修正

交流系统中与之相关的计算量。避免重新列写交流雅可比矩阵, 大大减少工作量, 程序通用性较好。

对于纯交流节点, 其功率方程为

$$f_{pai} = P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$f_{qai} = Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

对于换流器一次侧节点, 其功率方程为

$$f_{pdi} = P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm P_{di} = 0 \quad (4)$$

$$f_{qdi} = Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - P_{di} \tan \varphi_i = 0 \quad (5)$$

其中,  $P_{di}$  表示与该节点相连的直流线路传输功率。逆变侧发出有功, 为正; 整流侧吸收有功, 为负。而换流器需要无功功率, 直流系统不能提供, 所以不论整流或逆变侧, 都向系统吸收无功。

综合以上式(2)~式(5)得出的方程数与交流系统待求变量个数相等。由 1.1 节可以表述换流器的约束方程如下。

$$f_{d1} = U_d - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_T K_T U_T \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} n_T X_C I_d = 0 \quad (6)$$

$$f_{d2} = U_d - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_T K_T U_T \cos \varphi = 0 \quad (7)$$

第 3 个约束方程由欧姆定律得出

$$f_{d3} = \pm I_{dk} - \sum_{j=1}^{n_c} U_{dj} g_{dkj} \quad (k=1,2,\dots,n_c) \quad (8)$$

换流器的变量为直流电压、直流电流、换流变压器电压比、控制角和换流器功率因数。而一般约束方程有上述 3 个, 所以需要将两个独立变量设为定值, 即根据控制方式列写最后两个约束方程。其通用表达如下。

$$f_{d4} = d_4(U_d, I_d, K_T, \cos \theta_d) = 0 \quad (9)$$

$$f_{d5} = d_5(U_d, I_d, K_T, \cos \theta_d) = 0 \quad (10)$$

至此, 式(2)~式(10)构成了完整的交直流混联输电系统交替迭代法潮流计算方程。

## 2 电压稳定裕度指标

### 2.1 基于戴维南等效的电压指标原理

根据戴维南等效原理可知, 对于任意的一个电力系统, 在任意瞬间从某一负荷节点看进去, 均可将其等效成一个电势源经等效内阻向该节点负荷供电的两节点系统, 如图 2 所示<sup>[12]</sup>。其中  $E_{eq}$ ,  $Z_{eq}$  为

戴维南等效电动势和等效阻抗,  $U_i$ ,  $I_i$  分别该节点电压和电流,  $P_L+jQ_L$  为该节点所带负荷。

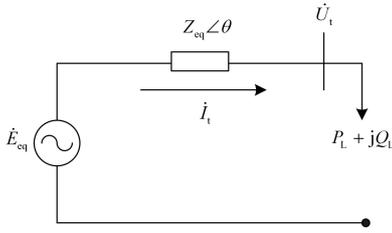


图 2 实时等效两节点系统  
Fig. 2 Real-time two node equivalent system

在图 2 中  $\dot{U}_i = U_{ir} + jU_{ii}$  可以经潮流计算得出; 对于纯交流节点  $P_L+jQ_L$  为已知量, 对于与直流线路相连的节点, 经过交替迭代法将直流侧等效成负荷与原节点负荷叠加得出。所以可以得出该两节点系统的  $j$  节点电流和负荷阻抗为

$$\dot{I}_i = I_{ir} + jI_{ii} = \left( \frac{P_L + jQ_L}{\dot{U}_i} \right)^* \quad (11)$$

$$Z_L \angle \varphi = \dot{U}_i / \dot{I}_i \quad (12)$$

对于电网计算中的恒功率负荷模型, 例如异步电动机, 其将电磁功率转化为机械功率, 以带动旋转机械工作, 若电磁功率小于机械功率, 则电机转速下降, 转差加大, 等效阻抗变小, 以求从电网吸收更多的电磁功率实现功率平衡<sup>[13]</sup>。由此可以得出如图 3 曲线。

图 3 中点虚线和实曲线分别代表负荷阻抗上的电压标幺值  $k=U_i/E_{eq}$  ( $U_i$  曲线可以由简单电路知识求出) 和功率极值比  $pm=P/P_{max}$ ,  $P$  为系统负荷阻抗功率。

$$P = \frac{E_{eq}^2 Z_L \cos \varphi}{(Z_L + Z_{eq})^2} \quad (13)$$

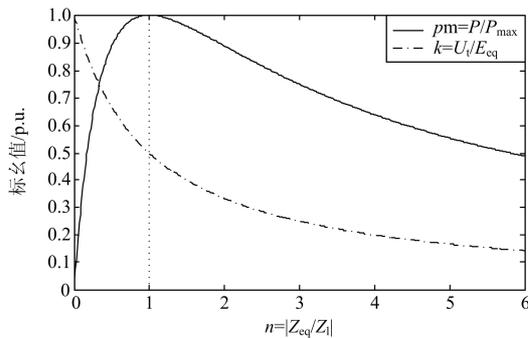


图 3 功率传输极限图  
Fig. 3 Power transfer limited diagram

变换上式得

$$P = \frac{E_{eq}^2 \cos \varphi / |Z_{eq}|}{\left| \frac{Z_L}{Z_{eq}} \right| + \left| \frac{Z_{eq}}{Z_L} \right| + 2 \cos(\theta - \varphi)} \quad (14)$$

$P_{max}$  为负荷阻抗最大功率, 根据功率极限传输定理, 可以得出

$$P_{max} = \frac{E_{eq}^2 \cos \varphi / 2 |Z_{eq}|}{1 + \cos(\theta - \varphi)} \quad (15)$$

由式(14)、式(15)得

$$pm = \frac{P}{P_{max}} = \frac{2 + 2m}{\frac{1}{n} + n + 2m} \quad (16)$$

其中:  $m = \cos(\theta - \varphi)$ ;  $n = |Z_{eq} / Z_L|$ 。由此可以得出图 3 所有曲线。

当两节点系统运行在图 3 中  $n=1$  线左侧时, 若因系统负载过重导致传输到该节点电磁功率下降, 则负荷会降低自身等效  $|Z_L|$ , 促使  $n$  增大, 原运行点趋向功率传输极限点移动, 保持自身功率平衡, 维持电压在一个可控范围之内; 同理若系统运行在  $n=1$  右侧时, 该节点一旦受到扰动, 导致功率不平衡, 电压迅速下降, 致使该节点电压崩溃, 严重影响系统稳定性。

以上分析建立在该节点戴维南等效参数近似不变的条件下。事实中, 当电网结构未发生重构或大扰动时,  $E_{eq}$ ,  $Z_{eq}$  变动范围在 5% 以下, 在工程应用中, 基本可以满足要求<sup>[14]</sup>。同时本文采用交替迭代法求解交直流潮流, 经过直流模型计算, 最终得出的功率值等效为负荷加入到交流系统中, 所以戴维南等效原理可以应用到交直流系统中。

由以上分析我们可以得出基于戴维南等效的交直流系统节点电压稳定裕度指标为

$$\eta = \frac{|Z_L| - |Z_{eq}|}{|Z_L|} \quad (17)$$

当  $0 < \eta < 1$  时, 系统电压稳定; 当  $\eta = 0$  时, 系统处于临界稳定状态; 当  $\eta < 0$  时, 系统电压失稳。由此指标我们可以看出该节点运行状态与稳定边界的距离, 从而以此为指标决定切负荷情况。

## 2.2 基于交直流潮流解的戴维南等效参数计算

戴维南等效电路中需要求解的量有  $E_{eqr}$ 、 $E_{eqi}$ 、 $R_{eq}$ 、 $X_{eq}$ , 需列写四个方程。根据基态潮流计算可以得出两个方程, 将负荷施加一微小增量二次潮流计算可以得出另外两个方程(对于负荷为 0 的节点, 无需切负荷, 即本文中不作裕度计算), 微增量的选取要小, 而且保证系统其他参数不变。经过仿真验证,

当采用负荷增量求取戴维南等效时, 等效电动势和等效内阻偏大; 当采用负荷减量求取时, 等效电动势和等效内阻偏小。其结果偏差有方向性。所以本文中为了减小单方向微增量导致的参数漂移问题, 再选取一微小减负荷量进行潮流计算同基态潮流数据组成另一方程组, 二者取平均值。

由此, 可以建立如式(18)增减负荷量两组线性方程组<sup>[15]</sup>。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{r1} & I_{i1} \\ 0 & 1 & -I_{i1} & -I_{r1} \\ 1 & 0 & -I_{r2} & I_{i2} \\ 0 & 1 & -I_{i2} & -I_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{eqr}} \\ E_{\text{eqi}} \\ R_{\text{eq}} \\ X_{\text{eq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\text{tr1}} \\ U_{\text{ti1}} \\ U_{\text{tr2}} \\ U_{\text{ti2}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

以上矩阵方程中,  $I_{r1}$ 、 $I_{i1}$ 、 $I_{r2}$ 、 $I_{i2}$ 可由式(11)求得,  $U_{\text{tr1}}$ 、 $U_{\text{ti1}}$ 、 $U_{\text{tr2}}$ 、 $U_{\text{ti2}}$ 可由潮流计算得出。

### 3 交直流系统低压减载量优化算法

#### 3.1 低压减载量优化目标函数和约束条件

##### 3.1.1 目标函数

减载量优化的最终目的是以最小的减载损失成本达到电压稳定的条件, 表述为

$$\min F = C_1 s_1 + C_2 s_2 + C_3 s_3 \quad (19)$$

在进行优化潮流计算程序前, 先将负荷根据企业用电、工业用电、城镇农村家庭用电等负荷重要等级的不同分成3类即  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ , 并根据实际情况估算减载后单位电量损失成本, 得出  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  成本控制系数。

##### 3.1.2 约束条件

优化过程的约束条件分为两类: 等式约束和不等式约束。其中等式约束已在上文潮流计算中详细列出。不等式约束是一系列安全性约束, 包括控制变量和状态变量约束, 进行减载量优化的前提是各变量都必须在合理的范围内。

控制变量约束包括发电机节点的端电压, 变压器可调分接头以及根据控制方式的不同换流器的电压、电流、功率或是控制角等。状态变量约束有发电机节点无功出力, 支路无功潮流, 换流器变压器电压比等<sup>[16]</sup>。

##### 3.1.3 电压指标约束

在满足以上等式及不等式约束的基础上, 控制减载量的关键是以电压稳定性指标为限制条件。在2.1节得出的电压稳定裕度指标  $\eta$  的基础上设立下限阈值。依据大量仿真数据统计(见4节算例), 阈值的大小与求取戴维南等效参数时所加负荷微增量的大小有很大关系, 本文中负荷微增量为原负荷的0.01%, 所以阈值取0.05。系统中任一节点电压稳

定裕度低于阈值时, 即进入低压减载程序。而当潮流计算状态变量越限时, 重新修正阈值。

##### 3.1.4 直流系统电压控制策略

根据两侧交流节点参数, 两端直流系统可以变换控制方式。本文进行直流系统潮流计算的原则是, 对已知的交流电压, 满足直流线路的控制要求下, 将换流站等效为节点负荷, 然后返回交流潮流计算; 当无法满足第一种控制要求时, 能够自动转换到第2种控制方式继续求解<sup>[17]</sup>。本文中将直流控制方式对于电压稳定裕度的贡献添加到交替迭代法潮流计算中, 即得出的电压指标已考虑直流控制方式的影响。

#### 3.2 基于改进遗传算法的低压减载量优化

低压减载量优化是一个多目标优化问题, 需要在发电机和补偿装置增加成本和负荷减载损失成本之间达到平衡。即在变量可行性约束条件的基础上, 以电压稳定指标为关键约束, 进行成本控制。

##### 3.2.1 改进遗传算法

遗传算法是一种建立在自然选择原理和自然遗传机制上的通过迭代获得最优解的搜索方法。其具有内在的隐并行性和快速寻优能力; 可以方便地处理混合整数/离散性问题; 采用概率化的寻优方法, 能自动获取和指导优化的搜索空间; 自适应地调整搜索方向, 不需要确定的规则<sup>[18-21]</sup>。

传统遗传算法的参数中交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  的选择是影响遗传算法行为和性能的关键所在, 直接影响算法的收敛性。 $P_c$  越大, 新个体产生的速度就越快, 然而  $P_c$  过大时会使得具有高适应度的新个体结果很快被破坏; 但是如果  $P_c$  太小, 会使搜索最优解的过程减慢, 一直停滞不前。对于变异概率  $P_m$ , 如果  $P_m$  太小, 就不易产生新的个体, 而不具有跳出局部最优解的能力, 如果  $P_m$  取值太大, 那么遗传算法就变成了随机搜索算法。所以本文中采用动态自适应遗传算法改善两种概率因子, 提高算法的适应度<sup>[22-23]</sup>。

在自适应算法中  $P_c$  和  $P_m$  按如下公式进行自适应调整。

交叉因子自适应求取方法

若  $f_{\text{fit}} > f_{\text{avg}}$ , 则

$$P_c = P_{\text{cmax}} - \frac{(P_{\text{cmax}} - P_{\text{cmin}}) \cdot (f_{\text{fit}}(i) - f_{\text{avg}})}{(f_{\text{max}} - f_{\text{avg}})} \quad (20)$$

若  $f_{\text{fit}} < f_{\text{avg}}$ , 则

$$P_c = p_c \quad (21)$$

其中:  $f_{\text{fit}}(i)$  为需交叉个体的适应度;  $f_{\text{avg}}$  为所有交叉个体的平均适应度;  $f_{\text{max}}$  为交叉个体的最大适应度;

$P_{cmax}$  为最大交叉概率;  $P_{cmin}$  为最小交叉概率。  
变异因子自适应求取方法

若  $f_{fit} > f_{avg}$ , 则

$$P_{m_m} = P_{mmax} - \frac{(P_{mmax} - P_{mmin}) \cdot (f_{fit}(i) - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})} \quad (22)$$

若  $f_{fit} < f_{avg}$ , 则

$$P_{m_m} = P_m \quad (23)$$

其中:  $f_{fit}(i)$  为需变异个体的适应度;  $f_{avg}$  为所有变异个体的平均适应度;  $f_{max}$  为变异个体的最大适应度;  $P_{mmax}$  为最大变异概率;  $P_{mmin}$  为最小变异概率。

### 3.2.2 改进遗传算法优化低压减载量流程

低压减载优化的目标函数  $\min F$  即为优化算法所需适应度函数。

下面对本文中改进遗传算法的步骤做详细说明如下。

(1) 初始化: 初始化步骤包括输入交直流系统低压过载原始数据, 确定遗传算法运行代数  $n$ , 交叉概率和变异概率上下限  $P_{cmax}$ 、 $P_{cmin}$ 、 $P_{mmax}$  和  $P_{mmin}$ , 确定每代样本个数  $popsize$ , 并随机产生初代群体。

(2) 适应度排序: 首先对交直流系统原始过载数据进行潮流计算, 并记录所有控制变量值于表 M; 其次对初代种群数据进行潮流计算; 将初代种群求得的控制变量值分别与表 M 求差, 并将结果代入目标函数, 即得到适应度值并对其进行排序。

(3) 选择: 从上一代中确定生成子代的父代群体: 计算所有上一代个体的适应度函数值后, 利用轮盘赌法选择出数量等同于每代群体数量的父代群体。

(4) 交叉: 得到父代群体后, 根据自适应算法求取交叉概率并得出交叉点, 将父代群体中的相邻个体(包括首尾两个个体)两两交叉。所谓交叉即为将两父代个体交叉点后的所有坐标按位置互换。

(5) 变异: 本文中变异针对 10 位二进制编码中的单独二进制位。求取自适应变异概率后, 根据概率任意选定二进制位将其反置。

(6) 优选: 在繁殖变异之后, 选择每代控制成本最小的个体并记录于表 D, 迭代完成后于表 D 中再次优选适应度最大个体, 即为所求交直流系统低压减载量。

## 4 算例验证

本算例分别以文献[24]中 4 机 11 节点系统和 IEEE30 节点系统为基础, 验证本文中基于电压稳定裕度指标的减载优化策略。为简化思路, 更具可读

性, 算例采用节点增加负荷的形式模拟交直流电网故障, 不考虑电网重构。

11 节点系统中 7-9 为直流支路, 节点 7 为整流侧, 节点 9 为逆变侧, 两侧带重载并在 7、8、9 节点分别加设大小为 325 Mvar、109 Mvar、395 Mvar 的无功补偿装置, 其他节点未加负荷。表 1 给出了直流支路初始标么值数据(本文算例参数均为标么值数据), 其中变比初始值为 1, 无功功率初始值为 0, 交直流系统标么值计算见文献[25]。

表 1 直流线路数据

Table 1 DC line data

节点	电压	控制角	有功功率	电流
7	1	0.323 93	0	2.202 8
9	1	0.383 97	1.809	2.202 8
节点	换相电抗	电阻	控制 1	控制 2
7	0.014 5	0.040 1	定触发角	定电流
9	0.014 5	0.040 1	定功率	定关断角

9 节点负荷为 17.67+j1, 改变 7 节点负荷得到表 2; 7 节点负荷为 9.67+j1, 改变 9 节点负荷得到表 3。

表 2 改变 7 节点负荷所得电压稳定指标

Table 2 Voltage stability index of changing 7 node load

7 节点负荷	7 节点指标	9 节点指标
8.67+j0.9	0.105 169	0.352 789
9.67+j1	0.096 244	0.343 657
10.67+j1.1	0.085 127	0.331 517
11.67+j1.21	0.072 766	0.315 794
12.67+j1.31	0.059 504	0.295 007
13.67+j1.41	0.045 592	0.267 570
14.67+j1.52	0.030 933	0.228 529
15.67+j1.62	0.014 636	0.162 125

表 3 改变 9 节点负荷所得电压稳定指标

Table 3 Voltage stability index of changing 9 node load

9 节点负荷	9 节点指标	7 节点指标
17.67+j1.00	0.343 657	0.096 244
18.67+j1.06	0.310 475	0.092 257
19.67+j1.11	0.277 378	0.087 581
20.67+j1.17	0.243 890	0.081 955
21.67+j1.23	0.209 583	0.075 130
22.67+j1.28	0.173 722	0.066 662
23.67+j1.34	0.134 374	0.055 393
24.67+j1.40	0.086 574	0.038 276

由表 2、表 3 数据可以清楚地看出在节点重载时, 电压指标偏低。但同时在本文取阈值为 0.05 的基础上系统仍可以运行, 也说明了阈值选取的可靠性。当 7、9 节点负荷增加时, 7 节点指标都小于 9

节点, 可以断定相对于节点 9, 7 电压更为薄弱。而当在 9 节点加负荷时, 9 节点电压指标下降更为迅速, 验证了节点电压稳定指标的灵敏度和可信度。

对于 IEEE30 节点系统, 将 3-5 支路加入一条直流线路, 3 为整流侧, 5 为逆变侧, 直流参数参照文献[9], 并计算初始稳定状态下部分节点戴维南等效参数和电压稳定裕度指标如表 4(28、29、30 节点未带负荷)。

从表 4 可以直观地看出各个节点的电压稳定裕度, 据此在电网稳定性分析中重点关注薄弱节点。

表 4 IEEE30 节点系统稳定状态下戴维南等值参数和电压指标

Table 4 Thevenin equivalent parameters and voltage index IEEE30 node system in steady state

节点	戴维南等效参数	电压稳定裕度指标
1	0.004700+j-0.088886	0.997 539
2	-0.012158+j-0.083460	0.800 989
3	-0.004342+j0.111881	0.780 273
4	-0.019018+j-0.128611	0.966 478
5	-0.043520+j-0.214367	0.971 409
6	-0.016381+j-0.218416	0.986 487
7	-0.074568+j-0.204239	0.971 72
8	0.061466+j-0.365096	0.976 354
9	0.005417+j-0.281220	0.975 702
10	0.000482+j-0.294085	0.988 473
11	-0.017643+j-0.245975	0.973 231
12	0.063366+j-0.364636	0.987 291
13	0.048564+j-0.354292	0.962 417
14	0.051027+j-0.341941	0.991 746
15	-0.018664+j-0.231735	0.950 185
17	0.045601+j-0.343268	0.987 191
18	0.024084+j-0.280352	0.967 516
20	0.324909+j-0.779891	0.962 338
23	0.212611+j-0.707089	0.980 442
24	0.229522+j-0.752455	0.910 330
25	-0.024098+j-0.040154	0.988 983
26	-0.058238+j-0.155810	0.841 992
27	-0.077592+j-0.071231	0.957 299

在稳态 IEEE30 节点的计算基础上, 对各个节点随机普加重载。在进行切负荷优化前, 为了验证优化算法的准确性, 将关注节点按切负荷成本大致分为三类, 然后采用改进遗传算法自动搜索切负荷策略。得出优化结果如表 5(阈值超限节点的优化结果)。

通过表 5 中电压指标优化前后的变化, 可以明显地看出本文的减载策略: 将电压稳定指标低于阈

表 5 IEEE30 节点系统低压减载优化结果

Table 5 Optimization results of low voltage load shedding in IEEE30 bus system

节点	减载量	优化前指标	优化后指标
3	0.004+j0.020	0.004 366	0.814 776
6	0.005+j0.010	0.027 507	0.666 547
15	0.004+j0.010	0.050 935	0.740 450
18	0.002+j0.005	0.021 534	0.577 928
20	0	0.006 270	0.099 440
23	0.001+j0.001	0.009 130	0.145 214
24	0.001+j0.003	0.016 427	0.166 945

值的节点作为优化算法的优化变量, 在此基础上进行最低成本控制, 得出优化结果。假设本文减载时间为 5 小时(在此只考虑有功损失), 减载后按负荷重要等级划分, 用户损失为 3 000、2 000 和 1 000 元/MWh, 负荷恢复成本为 300、200 和 100 元/MW。此次算例将 20 节点选为一级负荷, 23、24 选为二级负荷, 其他超过阈值的点优化前已列入非重要负荷, 在此基础上得出上文的减载量结果。算例中功率单位为标幺值, 本文功率基准值为 100 MW, 将各级负荷减载量结果与常规方法比较如表 6。

表 6 不同减载策略下损失成本比较

Table 6 Comparison of load shedding strategy and loss cost

整定方法	3 级	2 级	1 级	损失/万元
常规方法	2.0	0.5	0	153.0
指标限制方法	1.9	0.1	0.2	137.7
综合优化方法	1.7	0.2	0	96.9

常规减载策略是以某一地区故障发生概率为依据制定切负荷策略, 根据负荷重要等级分轮次分整定时延地切除本地负荷以满足母线电压需求。此种方式往往过于保守, 需要丰富经验, 而且严重缺乏灵活性和适应性。指标限制方法是未加优化算法而单纯将电压稳定指标作为约束得出最终减载量。本文结合智能优化方法同时以损失成本最小为目标函数仿真得出的优化策略表明, 在大电网中, 通过对联接非重要负荷的节点减载, 使重要节点未切负荷能够满足阈值约束, 从而在第一时间切除部分负荷, 保证系统安全的情况下减小系统损失成本。

## 5 总结

本文首先基于交替迭代法求解交直流混联系统潮流, 其中考虑直流系统控制方式的转换, 并将直流系统等效为交流系统的节点负荷, 原理简单, 便于分析交直流系统稳定性。

其次, 依据戴维南等效方法建立了适用于交直

流系统的电压稳定裕度指标, 并取双向变化量求解等效电路参数, 减小了指标的漂移误差。

最后, 以 11 节点系统和 IEEE30 节点系统为例, 验证了电压稳定指标的灵敏度和可信度, 并以指标为约束, 在改进遗传算法的基础上优化了系统低压减载量。仿真结果表明该指标的可用性, 同时优化算法也能降低切负荷的损失成本。

### 参考文献

- [1] 户秀琼, 颜伟, 余娟, 等. 交直流系统的静态电压稳定预防控制[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 35-39.  
HU Xiuqiong, YAN Wei, YU Juan, et al. Preventive control of static voltage stability for AC/DC power system[J]. Power System Automation Equipment, 2013, 33(1): 35-39.
- [2] 饶成诚, 夏哲辉. 风电、火电打捆直流并网系统拓扑结构设计及稳定性分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016 (2): 44-47, 78.  
RAO Chengcheng, XIA Zhehui. Topology Structure and Stability Analysis for Wind & Coal Grid-Connected System[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(2): 44-47, 78.
- [3] 汪娟娟, 张尧, 夏成军, 等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30-34.  
WANG Juanjuan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Survey of studies on transient voltage stability of AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 30-34.
- [4] 李圣清, 唐琪, 白建祥, 等. 链式静止同步补偿器直流侧电容电压平衡控制[J]. 电器与能效管理技术, 2014 (23): 60-64.  
LI Shengqing, TANG Qi, BAI Jianxiang, et al. DC Capacitor voltage balancing control for cascade multilevel statcom[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(23): 60-64.
- [5] 李国庆, 姜涛, 徐秋蒙, 等. 基于局部电压稳定指标的裕度灵敏度分析及应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 1-5, 30.  
LI Guoqing, JIANG Tao, XU Qiumeng, et al. Sensitivity analysis based on local voltage stability margin and its application[J]. Power System Automation Equipment, 2012, 32(4): 1-5, 30.
- [6] 何柳. 交直流混合输电系统的静态电压稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.  
HE Liu. Research on the static voltage stability of AC/DC hybrid transmission system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [7] MILOSEVIC B, BEGOVIC M. Voltage stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [8] HAQUE M H. Use of V-I characteristic as a tool to assess the static voltage stability limit of a power system[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(1): 1-7.
- [9] 刘剑, 范春菊, 郇能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.  
LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 73-80.
- [10] 谭涛亮. 基于改进连续潮流法及分岔理论的交直流系统电压稳定研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
TAN Taoliang. Study on voltage stability of AC/DC system based on improved continuation method and bifurcation theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [11] 彭磊. 交直流输电系统无功优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
PENG Lei. The research on reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [12] 颜伟, 文一字, 余娟, 等. 基于戴维南等效的静态电压稳定广域切负荷控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 88-92.  
YAN Wei, WEN Yiyu, YU Juan, et al. A wide-area load shedding strategy based on thevenin equivalence and considering static voltage stability[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 88-92.
- [13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] 李连伟. 基于戴维南等效的静态电压稳定极限快速计算方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.  
LI Lianwei. Research on Thevenin equivalent based fast estimation for steady-state voltage-stability margin computation methods[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [15] 安天瑜, 周苏荃. 一种电压薄弱负荷节点群的戴维南等效参数跟踪方法研究[J]. 继电器, 2007, 35(24): 21-25.  
AN Tianyu, ZHOU Suquan. Research on a weak voltage node group's Thevenin equivalents tracing method[J]. Relay, 2007, 35(24): 21-25.
- [16] 蒋平, 梁乐. 基于内点法和遗传算法相结合的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 724-729.

- JIANG Ping, LIANG Le. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system combining interior point algorithm and genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 724-729.
- [17] 刘毅力, 贾轩涛, 戴国安, 等. 永仁-富宁直流工程三种功率输送方式自动转换顺序控制及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 139-146.
- LIU Yili, JIA Xuantao, DAI Guoan, et al. Analysis of auto-sequence control and influence of three power transmission modes in Yongren-Funing HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 139-146.
- [18] 田延硕. 遗传算法的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- TIAN Yanshuo. Research and application of genetic algorithm[J]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2004.
- [19] 赵瑞. 多目标遗传算法应用的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- ZHAO Rui. Study on application of multi-objective genetic algorithm[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [20] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 90-96.
- KUANG Da, TENG Huan, WANG Bokun, et al. Capacity allocation and charging-discharging strategies study of storage battery based on improved genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 90-96.
- [21] 张宇娇, 徐彬昭, 徐天勇. 基于RBF-GA算法的特高压线路复合绝缘子均压环优化[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 19-24.
- ZHANG Yujiao, XU Binzhao, XU Tianyong. Optimization design for grading ring of composite insulators in UHV transmission lines based on RBF-GA[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 19-24.
- [22] 张武军, 叶剑锋, 梁伟杰, 等. 基于改进遗传算法的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 67-71.
- ZHANG Wujun, YE Jianfeng, LIANG Weijie, et al. Multiple-objective reactive power optimization based on improved genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 67-71.
- [23] 颜晓娟, 龚仁喜, 张千锋. 优化遗传算法寻优的SVM在短期风速预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 38-42.
- YAN Xiaojuan, GONG Renxi, ZHANG Qianfeng. Application of optimization SVM based on improved genetic algorithm in short-term wind speed prediction[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 38-42.
- [24] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [25] 何智文. 交直流混合电力系统无功优化模型及线性规划算法[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- HE Zhiwen. Reactive power optimization model and linear programming algorithm in AC/DC hybrid power systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2016-05-07

作者简介:

游金阔(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 345644231@qq.com

黄霆(1976-), 男, 硕士, 高工, 研究方向为电力系统运行与控制;

黄道姗(1977-), 女, 硕士, 高工, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 葛艳娜)