DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0263　　文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-11

提升电网分区互济能力的多类型FACTS设备优化配置

金维刚[1],陈圣彬[2],陈红坤[2],陶文强[2],陈磊[2]

(1. 国家电网有限公司华中分部,湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 为了解决无功支撑能力不足、内部增容困难、潮流分布不均等因素导致的电网分区互济能力不足问题,对可控串联补偿器、静止无功补偿器和统一潮流控制器这3种不同类型的FACTS设备进行了优化配置。提出了断面输电极限、断面潮流均衡度、电压偏差和网络损耗这4个指标以量化评估电网的分区互济能力,并以最大化电网分区互济能力为目标函数建立了优化模型。结合潮流计算模型,采用改进遗传算法在IEEE-30节点系统上对优化模型进行了求解,结果表明对多类型FACTS设备进行优化配置能够显著提高电网的分区互济能力。

关键词: 可控串联补偿器;静止无功补偿器;统一潮流控制器;分区互济能力;改进遗传算法

中图分类号: TM 721.2　**文献标志码:** A

Optimizing the Configuration of Multi-type FACTS Devices to Enhance the Mutual Assistance Capacity of Partitioned Power Grids

JIN Weigang[1], CHEN Shengbin[2], CHEN Hongkun[2], TAO Wenqiang[2], CHEN Lei[2]

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China;
2. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient reactive power support capacity, difficulty in internal capacity expansion, and uneven distribution of power flow, three different types of FACTS devices, namely thyristor-controlled series compensation (TCSC), static var compensator (SVC), and unified power flow controller (UPFC), were optimized and configured. Four indicators, namely section transmission limit, section power flow balance, voltage deviation, and network loss, were proposed to quantitatively evaluate the power grid mutual assistance capability. An optimization model was established with the objective function of maximizing the power grid mutual assistance capability. Combined with the power flow calculation model, an improved genetic algorithm was used to solve the optimization model on the IEEE-30 node system. The results indicate that optimizing the configuration of multiple types of FACTS equipment can significantly improve the power grid mutual assistance capability.

Key words: TCSC; SVC; UPFC; Power Grid Mutual Assistance Capability; Improved Genetic Algorithm

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 金维刚(1983-),男,高级工程师,主要从事电网规划与优化调度研究,E-mail: jinweigang@cc.sgcc.com.cn。
通信作者: 陈红坤(1967-),男,教授,博士,主要从事电能质量、电力系统规划研究,E-mail: chkinsz@163.com。

基金项目: 国家电网有限公司华中分部科技项目(编号:52140023000C)。

本文引用格式: 金维刚,陈圣彬,陈红坤,等.提升电网分区互济能力的多类型FACTS设备优化配置[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-11.

Citation: JIN Weigang, CHEN Shengbin, CHEN Hongkun, et al. Optimizing the Configuration of Multi-type FACTS Devices to Enhance the Mutual Assistance Capacity of Partitioned Power Grids[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-11.

随着我国电网建设进程的不断推进,500千伏电网的网架结构已逐步完善,220千伏电网的规模也在不断地扩大。目前,主要的城市电网已构建起以500千伏环网为主干、220千伏电网分区供电的分层分区网架结构[1-3],以应对500/220千伏电磁环网因线路N-1故障引发潮流转移而导致的热稳定问题[4]。各分区电网由内部的500千伏变电站和发电厂供电,这使得分区之间的相互影响较小[5],电网运行的独立性和安全性得到了提升,但随之也浮现出一些新的问题。由于电厂被划分到各个分区中,分区电网间的互济能力无法充分发挥,且单个分区的无功支撑能力匮乏,降低了系统整体供电能力。此外,土地资源的紧张、环保要求的提高等因素制约了本地电源的增设,导致分区内部的增容面临诸多困难。与此同时,区外可再生能源发电的输入比重却在持续增长,因其具有较大的不确定性,造成潮流分布不均等现象,给分区电网带来了新的安全稳定问题[6-7]。为了解决以上问题,以满足未来电力需求的快速增长和保证我国电网的可持续发展,亟需研究提升电网分区互济能力的方法。

柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)是电网中一项至关重要的技术,它通过灵活快速地改变系统各种参数,如电压、相角和线路阻抗等,来实现控制传输功率、优化潮流分布、提供无功补偿以及提高电力系统稳定性等目的[8]。根据其工作原理和应用场景,FACTS设备可以分为串联型、并联型和综合型,各种类型的设备都有其独特的功能,例如可控串联补偿器(Thyristor-controlled Series Compensation, TCSC)串联在线路中,通过调节自身等效电抗来控制线路传输有功功率[9];静止无功补偿器(Static VAR Compensator, SVC)并联在节点上,通过控制等效电纳来对节点注入无功功率或从节点吸收无功功率[10];统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)包含串联侧和并联侧,串联侧向线路注入一个可调等效电压来控制线路有功和无功潮流,并联侧对节点提供无功补偿,且从节点吸收有功功率以保持串联侧和并联侧的有功功率平衡[11]。鉴于FACTS设备各自的优势,若同时将多种类型的FACTS设备在分区电网中进行优化配置,能够克服单一设备功能的局限性,实现不同设备间功能的互补,增强电网潮流控制与无功支撑能力,从而有效提升电网分区互济能力。

近些年,国内外已有许多文献对FACTS设备的优化配置进行了研究。针对串联型或并联型FACTS设备,文献[12]将网络有功损耗最小化、设备安装成本最小化和系统电压稳定性最优作为优化目标,构建TCSC和STATCOM的多目标优化配置模型,并用改进的差分和声搜索算法进行求解;文献[13]以区域间可用输电能力和电压稳定指标为目标建立多目标优化模型,采用添加混沌初始化和变惯性权重设置的多目标粒子群算法来求解该模型,实现了考虑风电和负荷随机性的TCSC多目标优化配置;文献[14]建立了计及风电并网系统中可用输电能力、静态电压稳定性与投资成本的STATCOM双层优化配置模型,上层为多目标优化配置层,下层为最优潮流计算层,提出了基于网格法的多目标灰狼粒子群算法以求解优化问题。针对综合型FACTS设备,文献[15]将网络有功损耗、设备成本等多个指标作为目标函数,采用多目标遗传算法求解UPFC的优化配置问题;文献[16]选取发电机的经济成本作为优化目标,并采用Big-M法处理包含UPFC的非线性直流潮流方程,对UPFC的安装位置和容量进行优化;文献[17]提出了一种基于改进樽海鞘群算法和飞蛾扑火算法的UPFC选址定容方法以提高电力系统的动态稳定性,与其他算法相比,该算法的搜索能力提高且复杂度降低;文献[18]提出了一种考虑系统可预测性的UPFC多目标优化配置方法,以有功损耗和系统可预测性等为目标函数,同时考虑运行约束和不确定性,采用NSGA-Ⅱ算法进行求解;文献[19]提出了电网承载能力的量化指标,并在单个规划周期内分别将电网承载能力最大化和配置成本最小化作为目标函数,对DPFC进行优化配置,提升高渗透率新能源并网后电网的承载能力;文献[20]提出了一种基于混合整数线性规划的DPFC优化配置方法,在考虑经济性的情况下提高系统的负载能力。

尽管现有研究已取得显著成果,但仍存在一些局限性。首先,大多数研究主要集中于对一种或两种FACTS设备进行优化配置,而针对串联型、并联型及综合型三种设备联合配置的研究相对匮乏。其次,现有研究的优化目标主要集中在降低网络损耗、提高输电能力和降低安装成本等方面,尚缺乏针对提升电网分区互济能力的相关研究。

因此,本文以提升电网分区互济能力为目标,研究TCSC、SVC和UPFC这三种不同类型FACTS设备的优化配置。以断面输电极限、断面潮流均衡度、电压偏差和网络损耗这4个指标的组

合为目标函数建立优化模型,采用改进遗传算法进行求解。结果表明对三种FACTS设备进行优化配置后,电网的分区互济能力得到了显著提高。

1 含FACTS设备电网的潮流计算方法

在对包含多类型FACTS装置的整个系统进行潮流计算时,本文采用的是基于传统牛顿-拉夫逊法的联立求解法,将传统的功率不平衡方程与UPFC装置的内部约束方程进行联立组成潮流方程并用牛拉法进行迭代,最终求出各节点电压的幅值和相角、FACTS装置的状态变量以及系统潮流的分布。

1.1 TCSC和SVC模型

TCSC属于串联型设备,在稳态运行时等效为感性或容性的电抗。在本文潮流计算过程中TCSC采用阻抗模型,如图1所示。图中$R_{ij}+\mathrm{j}X_{ij}$为线路阻抗,$\mathrm{j}B_C$为线路导纳,X_{TCSC}为TCSC的等效电抗。

SVC属于并联型设备,可以看作并联在节点上的可变导纳。在潮流计算中SVC采用导纳模型,如图2所示。图中B_{SVC}为SVC的等效电纳。

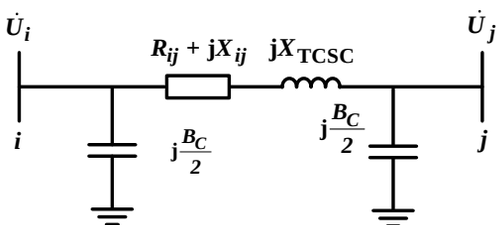


图1 TCSC阻抗模型

Fig.1 Impedance Model of TCSC

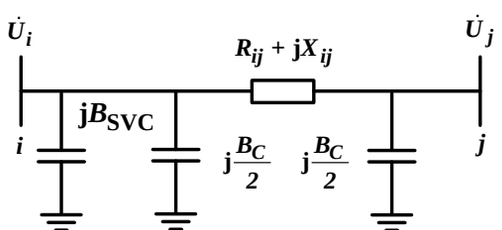


图2 SVC导纳模型

Fig.2 Admittance Model of SVC

1.2 UPFC模型

UPFC属于综合型设备,其常用潮流计算模型有电压源模型、功率注入模型、解耦模型等。本文采用电压源模型,如图3所示,UPFC安装在线路i-j靠近节点i处,并引入了一个附加节点k。图中U_{se}和θ_{se}为UPFC串联侧电压的幅值和相角,U_{sh}和θ_{sh}为UPFC并联侧电压的幅值和相角,Z_{se}和Z_{sh}为UPFC串联侧和并联侧的等效阻抗。

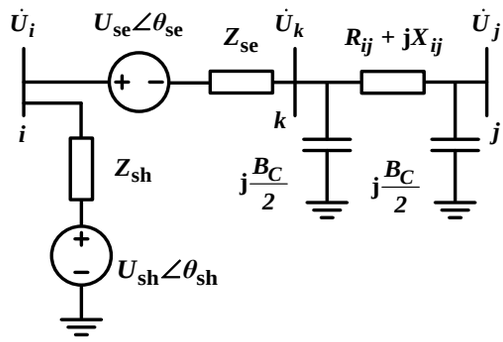


图3 UPFC电压源模型

Fig.3 Voltage Source Model of UPFC

1.3 计及FACTS设备的潮流方程

系统安装TCSC或SVC后,只改变节点导纳矩阵的部分元素而不增加内部约束方程;安装UPFC后,不仅需要改变节点功率不平衡方程,还要增加UPFC的内部约束方程。

图3中与UPFC关联的节点i与节点k的功率不平衡方程变为:

$$\begin{cases}\Delta P_i-P_{i,\mathrm{add}}=0\\ \Delta Q_i-Q_{i,\mathrm{add}}=0\\ \Delta P_k-P_{k,\mathrm{add}}=0\\ \Delta Q_k-Q_{k,\mathrm{add}}=0\end{cases}\tag{1}$$

式中:ΔP_i、ΔQ_i、ΔP_k和ΔQ_k为未加UPFC时的节点功率不平衡量;$P_{i,\mathrm{add}}$、$Q_{i,\mathrm{add}}$、$P_{k,\mathrm{add}}$和$Q_{k,\mathrm{add}}$为UPFC引起的节点附加功率。

UPFC的内部约束方程为:

$$\begin{cases}P_{\mathrm{sh}}+P_{\mathrm{se}}=0\\ P_{ik}-P_{ik,\mathrm{ref}}=0\\ Q_{ik}-Q_{ik,\mathrm{ref}}=0\end{cases}\tag{2}$$

式中:P_{sh}和P_{se}分别为并联侧和串联侧与系统交换的有功功率;P_{ik}、Q_{ik}为线路功率,$P_{ik,\mathrm{ref}}$、$Q_{ik,\mathrm{ref}}$为线路功率的给定值。

2 优化配置数学模型

2.1 FACTS设备的选址原则

为充分发挥UPFC的潮流调控特性,最大化UPFC工程的效益,UPFC的选址应遵循以下原则[21]:

(1)优先考虑省间联络断面和省内重要输电断面;

(2)优先选择潮流分布不均的输电断面;

(3)优先选择输电能力受热稳限制的断面;

(4)在UPFC应用于断面的情况下,解决输电

线路过载问题时通常将UPFC直接安装在过载线路上[22]。

为避免资源浪费,若某条线路或某个节点上已安装FACTS设备,则不应在同一地点再安装具有相似功能的设备。因此,SVC和TCSC的选址应避开UPFC所在的位置。此外,SVC不应安装在发电机节点等具备调压功能的节点上。

2.2 目标函数

利用FACTS设备的电压控制与潮流调节特性,能够有效提高电网区域间断面输送和灵活调节能力,充分发挥分区间能源资源互补优势,并确保电网安全稳定运行。本文设定以下4个指标来对电网的分区互济能力进行量化评估。

(1)断面输电极限

断面输电极限是互联系统安全可靠性评估的重要指标[23],同时也是影响电网分区互济能力的重要因素。

假设两个区域电网经由n条交流联络线互联,则可以将它们近似等值为图4所示的系统。图中$\dot{V}_s$和$\dot{V}_e$分别为送端电网和受端电网的等值电压,x_i为第i条联络线l_i的电抗,$i=1,2,\cdots,n$。

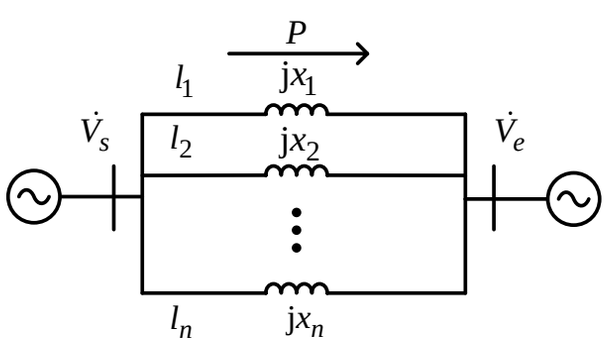


图4 经由断面互联的区域电网等值系统

Fig.4 Equivalent System of Regional Power Grid Through Cross Section Interconnection

本文忽略线路电阻和对地电纳,采用直流潮流方法进行计算,以便简化计算的同时又能保证良好的计算精度。首先计算系统的潮流转移比矩阵D,其第i行第j列元素D_{ij}如下所示[24]:

$$D_{ij}=\frac{\Delta P_{ij}}{P_j}=\frac{1/x_i}{\sum_{k=1}^{n}1/x_k-1/x_j} \tag{3}$$

式中:ΔP_{ij}为联络线l_j开断时转移到联络线l_i上的有功潮流;P_j为联络线l_j开断前的有功潮流;x_k为第k条联络线l_k的电抗。

潮流转移比矩阵D反映了某条联络线开断后,其有功潮流转移到其余联络线的比例。据此可以得到系统的联络线负载率矩阵L,其第i行第j列元素L_{ij}如下所示:

$$L_{ij}=\frac{P_i+\Delta P_{ij}}{P_{i\mathrm{N}}}=\eta_i+D_{ij}\times\frac{P_{j\mathrm{N}}}{P_{i\mathrm{N}}}\times\eta_j \tag{4}$$

式中:$P_{i\mathrm{N}}$为第i条联络线l_i的热稳定极限;η_i为联络线l_i的负载率,$\eta_i=P_i/P_{i\mathrm{N}}$。

联络线负载率矩阵L反映了某条联络线开断后,其余联络线的负载率。若矩阵L的最大元素为1,则说明此时断面已到达热稳定极限,即断面输电极限。因此,逐渐增加断面有功潮流,直到矩阵L的最大元素等于1,即可得到断面输电极限如下所示:

$$P_{\mathrm{limit}}=\sum_{k=1}^{n}P_k' \tag{5}$$

式中:P_k'为达到热稳极限时联络线l_k的有功潮流。

(2)断面潮流均衡度

互联电网间不同联络通道的线路阻抗与负载不同,可导致输电断面潮流分布不均衡,使断面传输功率受限于重载线路的热稳定极限,供电可靠性也存在隐患。若重载线路故障可能引起大规模潮流转移,引发连锁故障,从而导致大停电事故[25]。因此,断面潮流均衡度也是影响电网分区互济能力的一大因素。

本文采用联络线负载率的标准差来衡量断面潮流均衡度。对于图4所示包含n条联络线的系统,其断面潮流均衡度如下所示:

$$\begin{cases}\mu=\dfrac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\eta_k\\ \sigma=\sqrt{\dfrac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(\eta_k-\mu)^2}\end{cases} \tag{6}$$

式中:η_k为联络线l_k的负载率;μ为断面输电线路的平均负载率;σ为断面输电线路负载率的标准差,即断面潮流均衡度。

(3)电压偏差

电力系统中各个电压等级的电网都有相应的电压运行区间,各母线的电压大小是系统电压水平的直接反映。电压水平的变化不仅反映了不同运行方式对系统电压的影响,更能反映出系统潮流分布的合理性[26]。提高电压水平,对提升系统的安全稳定性与电网分区互济能力具有重要意义。

本文以系统的电压偏差来表征电压水平,其计算公式如下所示:

$$d_v=\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(V_k-V_{k\mathrm{ref}})^2} \tag{7}$$

式中：N为系统节点数；V_k为第k个节点的电压幅值；$V_{k\text{ref}}$为第k个节点的参考电压，通常取为1。

(4)网络损耗

网络损耗在衡量电网规划设计、生产运行以及经营管理水平时，发挥着重要作用，被视为电网中一个不可忽视的技术经济评估指标。因此本文将网损作为指标之一，以反映FACTS设备的规划设计水平。

在不改变网络结构的前提下，合理地配置FACTS设备是降低网损的一个重要手段。系统网络损耗如下所示：

$$P_{\text{loss}}=\sum_{i,j\in N_l}G_{ij}(V_i^2+V_j^2-2V_iV_j\cos\theta_{ij}) \tag{8}$$

式中：N_l为系统支路的集合；G_{ij}为节点i和节点j之间的电导；V_i、V_j和θ_{ij}分别为节点i的电压幅值、节点j的电压幅值和节点i与节点j电压的相角差。

本文旨在通过FACTS设备的优化配置来提升电网的分区互济能力，因此设定电网分区互济能力最大化作为优化目标。此为一个单目标优化问题，则目标函数为以上4个指标的加权和，各个指标的权重按其重要性人为指定，其中断面潮流均衡度、电压偏差、网络损耗为极小型指标，值越小越好，因此在此取倒数将其正向化，如下所示：

$$\begin{aligned}\max F=&0.4P_{\text{limit}}+0.3\frac{1}{\sigma}\\&+0.2\frac{1}{d_v}+0.1\frac{1}{P_{\text{loss}}}\end{aligned} \tag{9}$$

由于UPFC和TCSC分别通过控制线路潮流和调节补偿度来实现潮流控制，SVC通过调整等效电纳来实现无功补偿，因此待优化的变量有UPFC所在线路功率参考值P_{ref}与Q_{ref}、TCSC的安装位置L_{TCSC}与补偿度D_{TCSC}以及SVC的安装位置N_{SVC}与等效电纳B_{SVC}，而UPFC的安装位置可根据2.1节的选址原则来确定。各FACTS设备的最佳容量可在确定以上最优控制参数后求得。

2.3 约束条件

(1)等式约束

等式约束为系统的潮流方程。对于与UPFC不关联的节点$m(m\neq i,k)$，有：

$$\begin{cases}P_{\text{G}m}-P_{\text{L}m}-\sum V_mV_n(G'_{mn}\cos\theta_{mn}+B'_{mn}\sin\theta_{mn})=0\\Q_{\text{G}m}-Q_{\text{L}m}-\sum V_mV_n(G'_{mn}\sin\theta_{mn}-B'_{mn}\cos\theta_{mn})=0\end{cases} \tag{10}$$

式中：$P_{\text{G}m}$、$Q_{\text{G}m}$为节点m的发电机出力；$P_{\text{L}m}$、$Q_{\text{L}m}$为节点m的负荷；G'_{mn}、B'_{mn}为计及TCSC等效电抗和SVC等效电纳的节点导纳矩阵元素的实部和虚部。

对于与UPFC关联的节点i、k，有：

$$\begin{cases}\Delta P_i-P_{i,\text{add}}=0\\\Delta Q_i-Q_{i,\text{add}}=0\\\Delta P_k-P_{k,\text{add}}=0\\\Delta Q_k-Q_{k,\text{add}}=0\end{cases} \tag{11}$$

式中：ΔP_i、ΔQ_i、ΔP_k和ΔQ_k为未加UPFC时的节点功率不平衡量；$P_{i,\text{add}}$、$Q_{i,\text{add}}$、$P_{k,\text{add}}$和$Q_{k,\text{add}}$为UPFC引起的节点附加功率。

(2)不等式约束

不等式约束由状态变量约束和控制变量约束组成，主要包括发电机出力约束、节点电压约束、线路功率约束、UPFC功率参考值约束、TCSC补偿度约束和SVC补偿电纳约束，如下所示：

$$\begin{cases}P_{\text{G}i,\min}\leqslant P_{\text{G}i}\leqslant P_{\text{G}i,\max}\\Q_{\text{G}i,\min}\leqslant Q_{\text{G}i}\leqslant Q_{\text{G}i,\max}\\V_{i,\min}\leqslant V_i\leqslant V_{i,\max}\\P_{ij}\leqslant P_{ij,\max}\end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases}P_{\text{ref},\min}\leqslant P_{\text{ref}}\leqslant P_{\text{ref},\max}\\Q_{\text{ref},\min}\leqslant Q_{\text{ref}}\leqslant Q_{\text{ref},\max}\\D_{\text{TCSC},\min}\leqslant D_{\text{TCSC}}\leqslant D_{\text{TCSC},\max}\\B_{\text{SVC},\min}\leqslant B_{\text{SVC}}\leqslant B_{\text{SVC},\max}\end{cases} \tag{13}$$

式中：$P_{\text{G}i}$、$Q_{\text{G}i}$分别为第i台发电机的有功功率和无功功率；V_i为第i个节点的电压幅值；P_{ij}为线路i-j的有功功率；P_{ref}、Q_{ref}分别为UPFC所在线路的参考有功功率与参考无功功率；D_{TCSC}为TCSC的补偿度；B_{SVC}为SVC的等效电纳；各个变量的下标max与min分别表示其上、下限。

3 基于改进遗传算法的模型求解

3.1 改进遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm，GA)来源于染色体的进化机制，核心步骤包括选择、交叉、变异等以生成新的种群，新、旧种群经过持续的比较与筛选，最终收敛至最优解。其主要优势如下：

(1)GA可灵活应对各类优化问题，尤其是非线性、多峰、高维问题，无需复杂的数学模型，仅通过定义适应度函数即可评估解的质量。这种简便的实现方式使得GA在工程、经济等多个领域拥有高度普适性；

(2)全局搜索通常需要对解空间中的每个解进行评估，这在高维问题中极为耗时。而GA通过维护一个较小的种群，仅对部分解进行进化操作，与全局搜索相比，显著降低了计算量和时间成本，提高了求解效率。

鉴于这些优势，GA在工程实践中得到了广泛

应用。例如,在非线性规划问题中,GA通过惩罚函数将约束问题转化为无约束问题,从而高效找到全局最优解;在电力系统规划中,GA也展现出其在负荷和资源优化配置方面的强大能力。但是传统遗传算法可能存在收敛速度慢、易陷入局部最优等缺点[27]。因此,本文对传统遗传算法进行一定的改进,得到改进遗传算法,并以此对多类型FACTS设备的优化配置模型进行求解。

(1)选择操作改进

选择操作在GA中占据重要地位,若选择方式不当,会出现"早熟"现象,即陷入局部最优;由于交叉和变异的随机性,进化过程中种群最优个体可能会得不到保护而被破坏,导致算法的寻优效率大大降低[28]。基于以上考虑,本文在传统选择方式的基础上,加入了精英保留策略,将当前种群中最优的一些个体不经过交叉和变异操作,直接保留至下一代,这样能够有效提高算法的收敛速度。

(2)交叉操作改进

交叉概率的大小决定产生新个体的速度。概率越大,则产生新个体的速度越快,种群多样性也随之增加,但一些优良个体的基因会因此被破坏;概率越小,种群更新换代的速度就越慢,甚至会出现"停滞"现象。因此,交叉概率应合理设定。

在传统遗传算法中交叉概率为一个固定值,而本文考虑到不同进化时期和不同个体对交叉概率的要求不同,对交叉概率O_c进行动态调节,如下所示:

$$\lambda=\frac{t}{2T}+\frac{f'-f_{\text{avg}}}{2(f_{\max}-f_{\text{avg}})} \tag{14}$$

$$O_c=\begin{cases}O_{c,\max}-\lambda(O_{c,\max}-O_{c,\min}), f'\geqslant f_{\text{avg}}\\ O_{c,\max}, f'<f_{\text{avg}}\end{cases} \tag{15}$$

式中t和T分别为当前迭代次数和最大迭代次数;f'、f_{avg}和$f_{\max}$分别为两个交叉个体中较大的适应度值、种群平均适应度值和种群最大适应度值;$O_{c,\max}$、$O_{c,\min}$为交叉概率的上限和下限。

由式(14)和(15)可以看出,在进化前期,交叉概率较大,扩大了寻优空间;在进化后期,交叉概率较小,使优秀个体尽量延续下去。对于适应度值较低的个体赋予较大的交叉概率,而对于适应度值较大的个体,为了保护其优良基因,赋予较小的交叉概率。

(3)变异操作改进

变异概率的大小也会影响算法的性能。若变异概率太大,优良个体的基因被破坏的概率大大增加,减缓种群的进化速度;若变异概率太小,则会削弱算法产生新个体、维持种群多样性和克制"早熟"的能力。因此,个体应进行适当地变异,尽可能避免在寻优过程中陷入局部最优。

与交叉概率类似,对变异概率O_m进行动态调节,如下所示:

$$\alpha=\frac{t}{2T}+\frac{f-f_{\text{avg}}}{2(f_{\max}-f_{\text{avg}})} \tag{16}$$

$$O_m=\begin{cases}O_{m,\min}+\alpha(O_{m,\max}-O_{m,\min}), f\geqslant f_{\text{avg}}\\ O_{m,\max}, f<f_{\text{avg}}\end{cases} \tag{17}$$

式中$O_{m,\max}$、$O_{m,\min}$为变异概率的上限和下限;f、f_{avg}和$f_{\max}$分别为变异个体的适应度值、种群平均适应度值和种群最大适应度值。

3.2 求解步骤

本文利用改进遗传算法求解FACTS设备优化配置问题的步骤如下:

(1)输入线路阻抗与导纳、PQ节点的有功功率与无功功率、PV节点的有功功率与电压幅值等网络参数;设置迭代次数、种群规模、交叉概率、变异概率等算法参数;给定发电机出力、节点电压幅值及线路有功功率等状态变量和UPFC所在线路有功功率与无功功率、TCSC补偿度与SVC等效电纳等控制变量的取值范围;

(2)随机生成一个初始种群G_0,种群中每个个体的参数包括TCSC位置与补偿度、SVC位置与等效电纳以及UPFC所在线路有功功率与无功功率,并令此时的迭代次数$t=0$;

(3)根据每个个体的参数对安装TCSC、SVC与UPFC的系统进行潮流计算,求得种群G_t中每个个体的目标函数值;

(4)计算平均目标函数值,并重新计算交叉概率和变异概率;

(5)令$t=t+1$,依次对种群进行选择、交叉与变异操作,并保留最优个体,得到新一代种群G_t;

(6)判断是否达到最大迭代次数。若达到,则进化过程结束,输出种群G_t中的最优个体及其目标函数值。否则返回(3);

(7)根据最优个体的参数,计算出各FACTS设备的容量。

本文利用改进遗传算法求解FACTS设备优化配置问题的流程图如图5所示。

4 算例分析

为了验证所提算法和模型的有效性,本文在

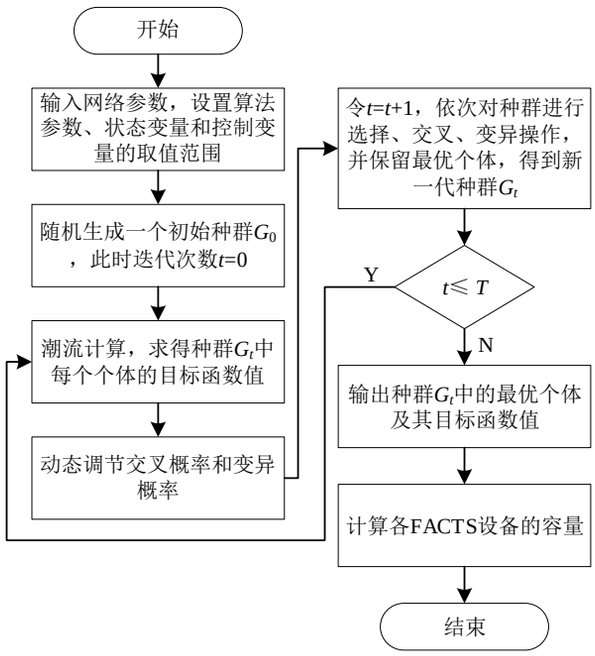


图5 利用改进遗传算法求解的流程图

Fig.5 A Flowchart for Solving Using the Improved Genetic Algorithm

IEEE-30节点系统上对FACTS设备进行优化配置。

该系统共有41条支路、6台发电机，节点1为平衡节点，节点2、5、8、11、13为PV节点，节点3、4、6、7、9、10、12、14～30为PQ节点，基准容量取100 MVA。其拓扑结构如图6所示，整个系统可以分为A、B两个区域，且由A区域向B区域送电，支路4-12、9-10、6-10、28-27共同组成了输电断面。

不失一般性，本文在该系统上对一台UPFC、两台TCSC和两台SVC进行优化配置。参照2.1节FACTS设备的选址原则，确定UPFC的安装位置为支路9-10上靠近节点9的一侧；由于UPFC也具有电压支撑功能，因此SVC除了不安装在PV节点上，也不应安装在节点9上，则SVC的备选安装位置共有23个节点；通常安装有UPFC的线路不应再安装其他串联型FACTS设备，因此TCSC除了不安装在变压器支路4-12、6-9、6-10、28-27上，也不应安装在支路9-10上，这样TCSC的备选安装位置共有36条支路。

设置最大迭代次数T=200，种群大小为100，交叉概率上、下限分别为0.9、0.6，变异概率上、下限分别为0.1、0.01。TCSC补偿度的取值范围为[-0.7, 0.7]。SVC等效电纳的取值范围为[-0.5, 0.5]。UPFC所在线路有功功率参考值的取值范围为[0.01, 0.53]，无功功率参考值的取值范围为[0.01, 0.44]。

分别应用传统遗传算法和改进遗传算法对优化配置模型进行求解，得到两种算法下FACTS设备的优化配置结果见表1，其中各个数据均为标幺值。

表2为优化前、应用传统遗传算法和改进遗传算法优化后的系统断面输电极限P_{limit}、断面潮流均衡度σ、电压偏差d_v和网络损耗P_{loss}。可以看出，用两种算法优化后，P_{limit}分别提升了22.9%和29.2%；σ分别下降了44.1%和43.6%；d_v分别下降了14.3%和25.2%；P_{loss}分别增加了1.5%和0.6%。虽然优化后网络损耗略有增加，但与优化前的值并没有显著差别。表3为优化前分区联络线的初始有功功率及用改进遗传算法优化后的有功功率，能够直观地看

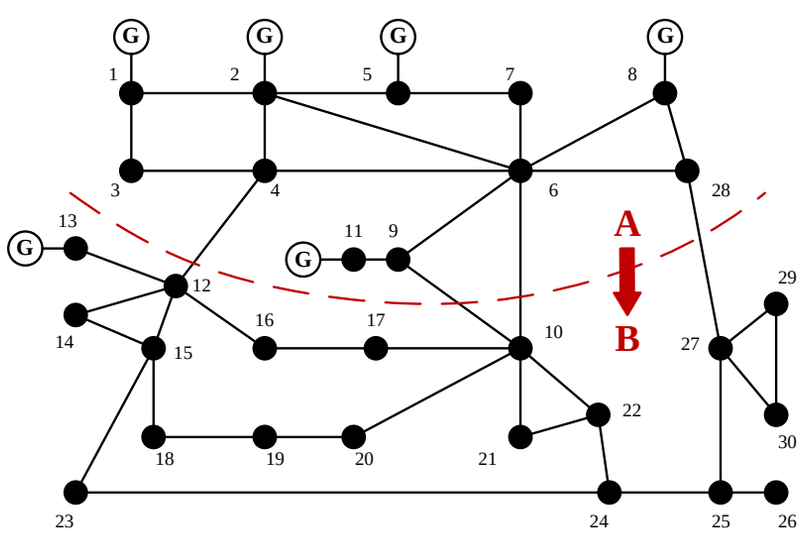


图6 IEEE-30节点系统拓扑图

Fig.6 Topology Diagram of IEEE-30 Nodes System

表1 两种算法下的优化配置结果

Table 1 Optimization Configuration Results Under Two Algorithms

变量/ p.u.	传统遗传算法	改进遗传算法
P_{ref}	0.2109	0.1857
Q_{ref}	0.2937	0.2170
L_{TCSC1}	6－28	25－27
D_{TCSC1}	0.2333	－0.5222
L_{TCSC2}	4－6	10－20
D_{TCSC2}	－0.5222	－0.5000
N_{SVC1}	12	12
B_{SVC1}	－0.4206	－0.5000
N_{SVC2}	20	24
B_{SVC2}	0.1032	0.1508
S_{UPFC}	0.1699	0.2901
Q_{TCSC1}	0.0035	0.0058
Q_{TCSC2}	0.0285	0.0112
Q_{SVC1}	0.4206	0.5000
Q_{SVC2}	0.1032	0.1508

出优化后的潮流分布更加合理。表2与表3的结果表明,优化后系统的分区互济能力得到了显著提升,且综合来看改进遗传算法的优化效果更好,分区互济能力的提升程度更大。

图7为三种情况下节点电压的幅值,可以直观地看出优化后节点电压幅值更加接近于额定值,说明系统电压水平得到了提高,且改进遗传算法的优化效果比传统遗传算法更好。

图8为分别用传统遗传算法与改进遗传算法求

表2 三种情况下电网分区互济能力指标值

Table 2 The Index Values of the Mutual Assistance Capacity of Partitioned Power Grid in Three Situations

	P_{limit}/ p.u.	σ/ p.u.	d_v/ p.u.	P_{loss}/ p.u.
优化前	1.7298	0.0818	0.1479	0.0533
传统遗传算法优化后	2.1258	0.0457	0.1267	0.0541
改进遗传算法优化后	2.2356	0.0461	0.1106	0.0536

表3 分区联络线初始潮流及优化后的潮流

Table 3 Initial and Optimized Power Flow of Partition Connecting Lines

支路	初始有功功率/ p.u.	优化后的有功功率/ p.u.
4－12	0.2538	0.2927
9－10	0.3262	0.1857
6－10	0.1123	0.1758
28－27	0.1663	0.2059

解时的种群进化过程,能够看到改进遗传算法更快地找到了最优解,且找到的最优解要优于传统遗传算法,证明了改进遗传算法的性能要优于传统遗传算法。

以上结果表明,应用改进遗传算法对不同类型的FACTS设备进行优化配置后,系统的分区互济能力得到了明显提升。

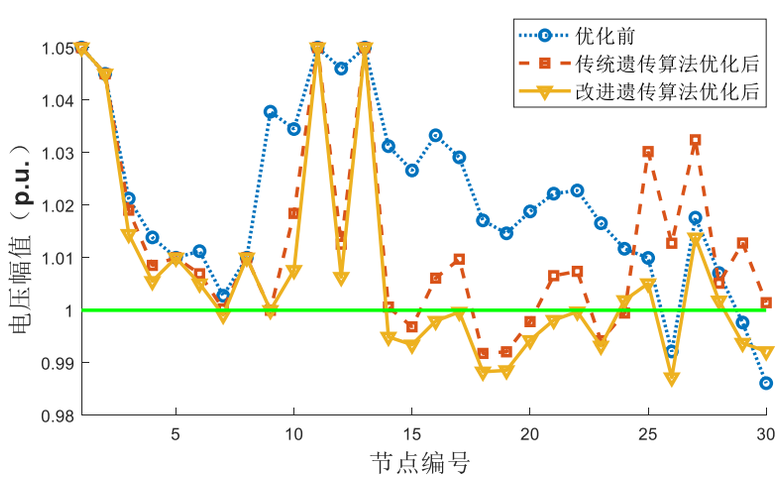


图7 三种情况下节点电压的幅值

Fig.7 The Amplitude of Node Voltage in Three Different Scenarios

5 结论

本文提出了一种TCSC、SVC与UPFC的联合优化配置方法以提升电网分区互济能力,并基于IEEE-30节点系统进行算例仿真。所得结论如下:

1)本文提出的断面输电极限、断面潮流均衡度、电压偏差和网络损耗4个指标能够较客观地描

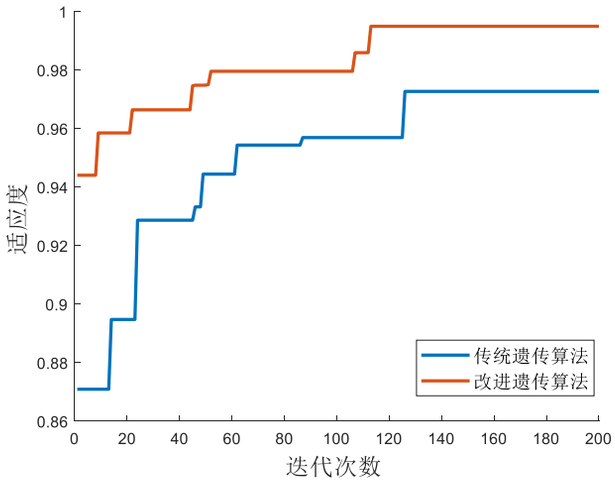


图8 分别用两种算法求解时的种群进化过程

Fig.8 The Population Evolution Process When Solving with Two Algorithms Separately

述电网的分区互济能力。

2）TCSC与UPFC能够灵活控制线路潮流，SVC能够实现电压支撑，同时对TCSC、SVC与UPFC三种不同类型的FACTS设备进行合理配置，能够在不增加网络损耗的前提下提高断面输电极限、改善断面潮流均衡度、降低电压偏差，从而提升电网分区互济能力。

3）本文所提出的改进遗传算法拥有比传统遗传算法更好的性能，可推广应用于其他电力系统优化问题。

参考文献：

[1] 唐晓骏，韩民晓，谢岩，等. 应用于城市电网分区互联的柔性直流容量和选点配置方法[J]. 电网技术，2019，43(05)：1709-1716.
TANG Xiaojun，HAN Minxiao，XIE Yan，et al. Capacity and siting configuration method of VSC-HVDC applied to urban power grid partition interconnection[J]. Power System Technology，2019，43(5)：1709-1716.

[2] 李智轩，陈亦平，雪映，等. 多分区异步互联电力系统频率稳定分析与控制研究综述[J/OL]. 电网技术，1-25[2024-06-20].
LI Zhixuan，CHEN Yiping，XUE Ying，et al. Review of Frequency Stability Analysis and Control Research of Multi-Area Asynchronous Interconnected Systems [J/OL]. Power System Technology，2024.

[3] 汪际峰，陈亦平，徐光虎，等. 多分区异步互联电网的直流频率限制器协调控制策略研究[J]. 电网技术，2023，47(10)：3971-3979.
WANG Jifeng，CHEN Yiping，XU Guanghu，et al. Coordination strategy of frequency limit control on multi-area HVDCs under asynchronous interconnection [J]. Power System Technology，2023，47(10)：3971-3979.

[4] 伏祥运，朱立位，赵喆，等. 计及动态电压稳定约束的分区柔性互联电网最大供电能力计算[J]. 电网技术，2023，47(02)：553-563.
FU Xiangyun，ZHU Liwei，ZHAO Zhe，et al. Total power-supply capacity calculation of partitioned interconnected power grid considering dynamic voltage stability constraints[J]. Power System Technology，2023，47(2)：553-561.

[5] 贾宏杰，穆云飞，侯恺，等. 能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：49-62.
JIA Hongjie，MU Yunfei，HOU Kai，et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(16)：49-62.

[6] 李佳蔚，张冠宇. 大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响[J]. 中国电力，2024，57(06)：174-180.
LI Jiawei，ZHANG Guanyu. Impact of Large Scale Distributed New Energy Access on Provincial Power Grid Stability[J]. Electric Power，2024，57(06)：174-180.

[7] 杨燕，程鑫，金楚，等. 多直流馈入受端电力系统分区及互联优化方法[J]. 电力系统自动化，2020，44(17)：168-174.
YANG Yan，CHENG Xin，JIN Chu，et al. Optimization method for partition and interconnection of multi-infeed DC receiving-end power system [J]. Automation of Electric Power System，2020，44(17)：168-174.

[8] SHAKARIAN Y，NOVIKOV N，SOKUR P，et al. Classification and characteristics of devices of flexible AC transmission systems(FACTS) [J]. Power Technology and Engineering，2019，52(6)：723-728.

[9] ZHENG L，KUANG H，ZHANG S，et al. Voltage stability improvement of wind power grid-connected system using TCSC-STATCOM control[J]. IET Renewable Power Generation，2019，13(2)：215-219.

[10] XU X，LI J，XU Z，et al. Enhancing photovoltaic hosting capacity-a stochastic approach to optimal planning of static var compensator devices in distribution networks[J]. Applied Energy，2019，238：952-962.

[11] WU X，WANG R，WANG Y F，WANG Liang. A Novel UPFC Model and its Convexification for Security-Constrained Economic Dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2022，37(6)：4202-

4213.

[12] 张涛, 徐雪琴, 冉华军. 基于改进差分和声搜索算法的FACTS设备的多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(03): 727-734.
ZHANG Tao, XU Xueqin, RAN Huajun. Multi-objective optimal allocation of facts devices based on improved differential evolution harmony search algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 727-734.

[13] 刘文丽, 张涛, 杨晓雷, 等. 计及负荷随机性含风电电力系统TCSC多目标优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(05): 58-69.
LIU Wenli, ZHANG Tao, YANG Xiaolei, et al. Multi-objective optimal allocation of TCSC for a power system for wind power and load randomness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 58-69.

[14] 陶然, 张涛, 冉华军, 等. 计及可用输电能力的风电并网系统中STATCOM的双层优化配置[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 86-93.
TAO Ran, ZHANG Tao, RAN Huajun, et al. Bi-level optimal configuration of STATCOM in wind power grid-connected system considering available transfer capacity[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 86-93.

[15] 张大波, 朱志鹏, 连帅, 等. 基于多场景变权多目标优化的UPFC在风电并网系统中的配置方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(02): 638-645.
ZHANG Dabo, ZHU Zhipeng, LIAN Shuai, et al. Allocation scheme research of UPFC based on multiple scenarios with different weighting coefficients and multi-target optimization in wind power integrated system[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 638-645.

[16] 刘畅, 吴军, 郝露茜, 等. 基于直流潮流的UPFC优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(05): 42-48.
LIU Chang, WU Jun, HAO Luxi, et al. Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 42-48.

[17] Kumar V B , Ramaiah V . Enhancement of dynamic stability by optimal location and capacity of UPFC: A hybrid approach[J]. Energy, 2020, 190.

[18] Galvani S , Hagh T M , Sharifian B B M , et al. Multiobjective Predictability-Based Optimal Placement and Parameters Setting of UPFC in Wind Power Included Power Systems. [J]. IEEE Trans. Industrial Informatics, 2019, 15(2): 878-888.

[19] 王智伟, 张振宇, 李征, 等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的DSSC优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(06): 179-187.
WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 179-187.

[20] DAI J, TANG Y, LIU Y, et al. Optimal configuration of distributed power flow controller to enhance system loadability via mixed integer linear programming[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1484-1494.

[21] 申旭辉, 刘建坤, 高雯曼, 等. 500kV UPFC适用场景的量化评估方法和选点方案[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 65-71+78.
SHEN Xuhui, LIU Jiankun, GAO Wenman, et al. Quantitative Evaluation Method and Application Scheme of 500 kV UPFC Applicable Scene. Electric Power, 2019, 52(10): 65-71+78.

[22] 高雯曼. UPFC的优化配置及相关控制策略研究[D]. 保定:华北电力大学, 2019.
Gao Wenman. Research on UPFC's Optimal Configuration and Related Control Strategy[D]. North China Electric Power University, 2019.

[23] 李康文, 邱高, 刘挺坚, 等. 基于可迁移强化学习的断面输电极限计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5147-5158.
LI Kangwen, QIU Gao, LIU Tingjian, et al. Transmission Limit Calculation of Corridors Based on Transferable Reinforcement Learning[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5147-5158.

[24] 赵娟, 申旭辉, 吴丽华, 等. 结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(03): 97-101.
ZHAO Juan, SHEN Xuhui, WU Lihua, et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 97-101.

[25] 高雯曼, 任建文, 申旭辉, 等. 基于断面负载均衡度的统一潮流控制器潮流优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 79-85.
GAO Wenman, REN Jianwen, SHEN Xuhui, et al. Control method of power flow optimization for unified power flow controller based on section load balance degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 79-85.

[26] 周宝玉. 基于改进主成分分析的电网分区方案评价模型的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2015.
Zhou Baoyu. Research on Evaluation Model for Grid Partition Scheme Based on Improved Principal Component Analysis[D]. North China Electric Power University, 2015.

[27] 谢虎,杨占杰,张伟,等.基于改进遗传算法的主动配电网优化定价策略研究[J].电测与仪表,2024,61(07):116-122.
Hu Xie, Zhanjie Yang , Wei Zhang, et al. Research on optimal pricing strategy of active distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(07): 116-122.
[28] 吴星,刘天羽,江秀臣,等.基于改进遗传算法的海上风电场无功优化[J].电测与仪表,2020,57(04):108-113.
WU Xing, LIU Tianyu, JIANG Xiuchen, et al. Research on reactive power optimization of offshore wind farm based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 108-113.