

不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网 动态稳定水平的研究

朱涛¹, 段荣华¹, 汪震²

(1. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 滇西地区小水电云集, 距主网电气距离远, 动态稳定问题突出。为改善滇西电网的动态稳定水平和送出能力, 基于受扰时序轨迹动态性能指标及投资成本建立了滇西电网分别配置 SVC、STATCOM 和 TCSC 单一 FACTS 元件的综合优化模型, 并应用改进差异优化算法求解出滇西电网配置不同类型单一 FACTS 元件的最佳点和容量。计算结果表明, 采用最佳单一配置 SVC、STATCOM、TCSC 方案时, STATCOM 是改善滇西电网动态稳定水平效果最好的单一 FACTS 元件。

关键词: 灵活交流输电系统; 动态稳定; 受扰时序轨迹法; 改进差异优化算法; 滇西电网

Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid

ZHU Tao¹, DUAN Ronghua¹, WANG Zhen²

(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Controlling Center, Kunming 650011, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Lots of small hydropower stations gather in the west of Yunnan province, where are far from Yunnan main power grid in electric distance, and therefore dynamic stability in this area is serious. Based on the disturbed temporal trajectory dynamic performance index and cost of investment, SVC, STATCOM and TCSC single FACTS element integrated optimization model is established respectively in order to improve the dynamic stability and transmission ability. And an improved difference evolution algorithm is applied for the different types of single FACTS element configuration parameter and capacity. The result shows that STATCOM is the best single FACTS element to improve dynamic stability Western Yunnan power grid.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050205).

Key words: FACTS; dynamic stability; disturbed temporal trajectory; improved difference evolution algorithm; Western Yunnan power grid

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)20-0065-06

0 引言

云南电网的小水电资源非常丰富, 其分布主要集中在远离负荷中心的滇西地区。由于受地理环境制约及小水电基本以 110 kV 及以下电压等级接入电网, 导致滇西地区电网与主网的电气距离非常长, 造成滇西地区电网的动态稳定突出、电网发生低频

振荡事件的概率大, 制约了滇西小水电的送出^[1]。

为改善滇西地区电网动态稳定问题, 云南电网已采取在小水电机组配置 PSS 及加强网架建设的措施, 虽然对改善动态稳定水平取得了一定效果, 但目前小水电机组配置 PSS 的机组容量已超过装机容量的 80%, PSS 投入对电网动稳水平提高的潜能已充分挖掘, 此外, 加强区域内 500 kV、220 kV 主网网架结构难以在短期内改变中小水电主要接入的 110 kV 线路电气距离长、与主网连接较弱的局面^[1-2]。因此, 探索新技术来改善滇西电网的动态稳定水平

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目
(2012AA050205)

以提高电力送出尤为迫切。柔性交流输电系统(FACTS)快速可靠的调节性能为电网控制提供了新的手段^[3-7],在短期内无法改变滇西网架情况下,研究配置 FACTS 设备来提高滇西电网动态稳定性和输送能力具有重要意义。

本文基于时间乘平方误差积分的指标评估稳定性方法,提出了滇西电网分别配置 SVC、STATCOM 和 TCSC 装置的最佳方案,根据最佳方案对比分析了分别配置单一的 SVC、STATCOM 和 TCSC 对改善滇西动态稳定性和提高滇西电力送出的效果,计算结果表明,滇西电网中配置单一的 STATCOM 效果最好,配置单一的 SVC 效果次之,配置单一的 TCSC 效果最差,其研究方法和结论为云南电网十三五规划提供新的思路和依据。

1 FACTS 元件的 BPA 模型

1.1 静止无功补偿器(SVC)模型

随着大功率电力电子器件制造技术的发展,TCR/TSC 已经成为 SVC 的主流实用技术。从装置构成来看,TCR 型的 SVC 装置主要由滤波/电容支路和 TCR 支路组成^[8]。BPA 中 SVC 的模型^[9]如图 1 和图 2 所示。

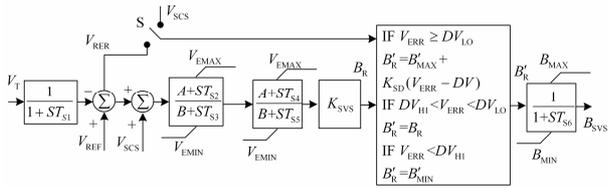


图 1 BPA 中 SVC 模型
Fig. 1 SVC model in BPA

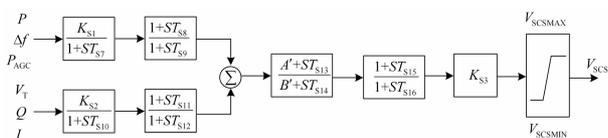


图 2 BPA 中 SVC 辅助信号模型
Fig. 2 SVC auxiliary signal model in BPA

SVC 模型待优化参数包括: T_{S2} 、 T_{S3} 、 K_{SVS} 、 T_{S8} 、 T_{S9} 、 K_{S3} 及容量值,容量范围在 20~200 Mvar。

1.2 静止无功发生器(STATCOM)模型

STATCOM 是综合静止无功补偿、电压源逆变器(VSC)、大功率门极可关断晶体管(GTO)或绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的控制与保护等技术而形成的无功补偿设备^[10]。

BPA 中的静止无功发生器(STATCOM)模型^[9]如图 3 和图 4 所示。STATCOM 模型中待优化参数包括: T_2 、 T_3 、 K_D 、 T_{S8} 、 T_{S9} 、 K_{S3} 及容量值,容量

范围在 20~100 Mvar。

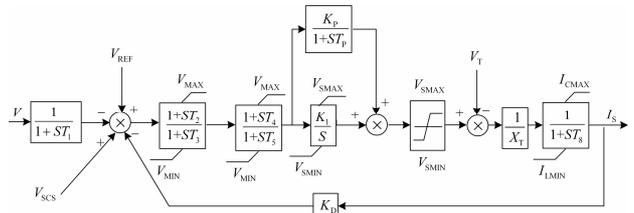


图 3 BPA 中 STATCOM 模型
Fig. 3 STATCOM model in BPA

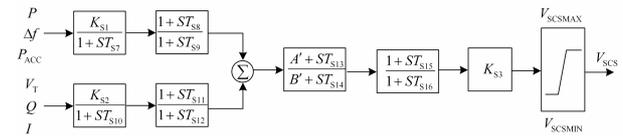


图 4 BPA 中 STATCOM 辅助信号模型
Fig. 4 STATCOM auxiliary signal model in BPA

1.3 可控串补补偿器(TCSC)模型

TCSC 主要由电力电容器 C、旁路电感 L、两个反相并联大功率晶闸管 SCR 四个元器件组成,其中,旁路电感 L 和 SCR 组成晶闸管控制的电抗^[11]。BPA 中的可控串补模型^[9]如图 5 所示。TCSC 模型中待优化参数包括: $T_1 \sim T_4$ 、 K_M , 可控串补度及固定串补度,并确定相应的容量值。固定串补的补偿度范围为 0~30%, TCSC 的补偿度范围为 5%~15%, 额定提升系数固定为 1.5。

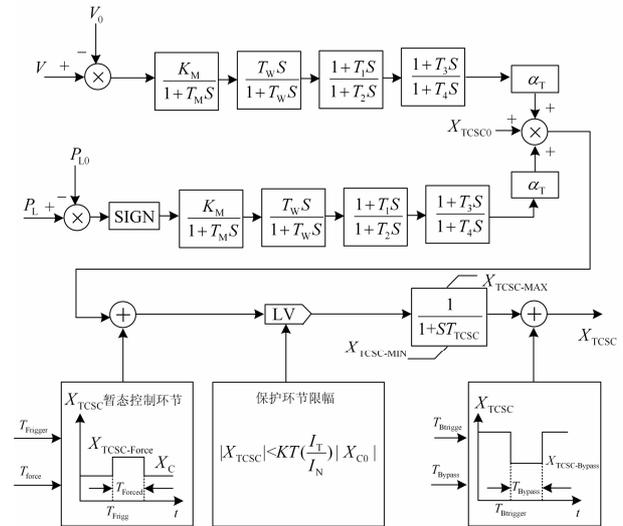


图 5 BPA 中 TCSC 模型
Fig. 5 TCSC model in BPA

2 滇西电网单一 FACTS 元件最佳配置位置的选择

2.1 受扰时序轨迹动态性能指标

基于在自动控制理论中时间乘平方误差积分

(ITSE)的指标定量评估系统的动态性能优劣, 定义时间乘平方误差积分为

$$ITSE = \int_0^{\infty} t \cdot e^2(t) dt \quad (1)$$

以滇西地区主要电力送出通道上的有功功率为观测对象, 采用如下的指标用于评估观测量在扰动条件下的动态稳定性能。

$$e_i(t) = \frac{P_{L,i}^{(k)}(t) - P_{L,i}^{(k)}(t_{sim})}{P_{L,i}^{(k)}(0)} \quad (2)$$

$$J_{i,k} = \sqrt{\int_{t=0}^{t=t_{sim}} t \cdot e_i^2(t) dt} \quad (3)$$

$$J_k = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} J_{i,k} \quad (4)$$

式中: t_{sim} 是仿真时长; $i=1, \dots, N_0$, 表示 N_0 个观测线路索引; $e_i(t)$ 表示第 i 条观测线路上的功率波动偏差标么值; $J_{i,k}$ 是第 k 个故障条件下第 i 条观测线路的性能指标定义, J_k 是在第 k 个故障条件下多条线路的平均性能指标。为了在不同线路间的功率波动偏差有可比性, 在式(2)中引入标么化操作。显然 J_k 值越低, 在特定故障下总体上信号的时间响应偏差就越小, 系统的动态性能越好。

2.2 综合优化模型的建立

在 FACTS 设计中, 本文同时考虑系统动态稳定性和 FACTS 项目的动态投资成本, 提出以下综合优化模型。

$$C = \sum_i w_i \cdot C_i \quad (5)$$

$$\text{Min}_{C_i, x} F = \sum_k \beta_k J_k + M \cdot C \quad (6)$$

$$x_{p, \min} \leq x_p \leq x_{p, \max} \quad (7)$$

$$V_{\min} \leq V(\infty) \leq V_{\max} \quad (8)$$

$$P_{g, \min} \leq P_g(\infty) \leq P_{g, \max} \quad (9)$$

$$Q_{g, \min} \leq Q_g(\infty) \leq Q_{g, \max} \quad (10)$$

$$P_{L, \min} \leq PL(\infty) \leq P_{L, \max} \quad (11)$$

$$\max_{\forall i, j} |\delta_i(t) - \delta_j(t)| \leq \delta_{\max} \quad (12)$$

式(5)为多个设备容量(成本)间的折算公式, w_i 为设备间的折算系数, 为了统一使用设备容量, 引入折算系数 w_i , 本文中对应 SVC、STATCOM 和 TCSC 的比例系数是 1 : 2 : 2.5。

式(6)为结合系统暂态轨迹性能指标和容量成本的综合优化目标函数, k 为故障集中故障索引, β_k 表示第 k 个故障的重要程度系数, $\sum_k \beta_k = 1$, M 为加权系数, 目的是将性能指标和投资成本统一到同

一个目标函数中。 M 可以根据对性能指标和投资成本的偏好进行调整, 本文 M 取值为 0.01, 表示对改善系统动态性能的偏好。

式(7)~式(12)为约束条件, 式(7)表示控制器参数约束条件, 其中 x 代表实际的阻尼控制器的参数向量, $x_{p, \max}$ 、 $x_{p, \min}$ ($p=1, \dots, n_q$) 是 n_q 个控制器参数的上下限; 式(8)表示系统稳态母线电压约束; 式(9)、式(10)分别表示发电机的有功和无功约束; 式(11)表示系统稳态线路热稳约束, 式(12)表示暂态功角稳定约束, 任意两机功角差不能超过限定值(如 250°)。

2.3 综合优化模型求解

第 2.2 节的优化模型是一个高度非线性并且多模态的优化问题, 即问题本身存在多个局部最优解, 而且也存在多解的可能性。在进化算法领域, 保持算法鲁棒性关键在于控制合理的种群多样性, 如果种群多样性无法保证, 则算法容易陷入停滞状态。此外, 如果种群过于多样则无法保证算法收敛。陷入停滞状态的进化算法其最终解很有可能是某个局部最优, 因此在进化算法陷入停滞, 如何让算法摆脱停滞状态是一个非常重要的问题。

本文采用改进差异进化算法(DE)来解决算法停滞的问题, 通过引入复杂系统中的混沌过程来解决种群停滞导致的算法早熟问题。

2.3.1 混沌操作流程

引入著名的混沌推理方程(logistic equation)用于构建混沌变异运算, 推理方程定义为^[12]

$$y[n+1] = \mu \cdot y[n] \cdot (1 - y[n]), \quad 0 \leq y_n \leq 1 \quad (13)$$

式中: μ 是控制参数; y_n ($n=0, 1, 2, \dots, M$) 是混沌变量; M 表示推理次数。虽然混沌推理方程本身是确定性的, 但当 μ 增至 $3.57 \leq \mu \leq 4.0$ 时, y_n 的周期变为无穷大, 推理方程便构成一个混沌系统空间, 取 $M=300$, $\mu=4$ 。

混沌变异的步骤如下:

(1) 对于特定的第 i 个体, 当一次 $[0, 1]$ 随机数小于混沌变异概率 p_{cm} 时, 执行下面的步骤, 否则该个体保持不变;

(2) 将其第 j 个变量值 $x_{i,j}$ 通过变换映射到 $(0, 1)$ 空间, 得到混沌变量初始值为

$$y_j[0] = \frac{x_{i,j} - p_j^{\min}}{p_j^{\max} - p_j^{\min}} \quad (14)$$

(3) 根据式(13)混沌推理公式得到混沌变量的最终值 $y_j[n]$;

(4) 将混沌变量映射回原问题空间;

$$x_{i,j} = p_j^{\min} + y_j[n] \cdot (p_j^{\max} - p_j^{\min}) \quad (15)$$

(5) 重复(2)~(4)直到第 i 个体的所有变量都完成混沌变异。

2.3.2 改进差异进化算法流程

整个改进 DE 算法的流程图见图 6 所示, 其中虚线部分为标准 DE 的解法流程, 而改进 DE 算法进一步在算法停滞阶段引入了混沌操作, 算法步骤如下。

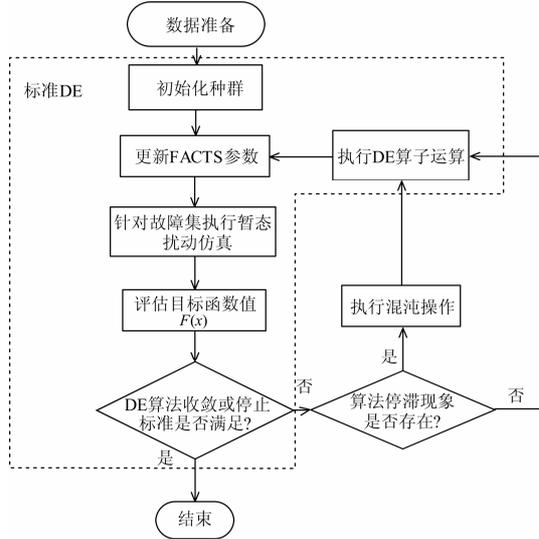


图 6 改进 DE 算法求解流程

Fig. 6 Flow chart of FACTS controller tuning by DE

第 1 步, 初始化。对种群中 N_p 个个体按式(16)进行初始化, 该种群成为初始父代种群; 通过将染色体映射为一组控制器参数, 对初始种群的每一个个体的目标函数进行评估, 并得到其中的最优个体 x_{best} 。

$$x_{i,j}[0] = U(p_j^{\min}, p_j^{\max}) \quad (16)$$

式中: $x_{i,j}[k]$ 表示第 k 代中第 i 个个体的第 j 个变量的取值, $k=0$ 表示初始种群; p_j^{\max} 和 p_j^{\min} 为第 j 个变量的上下限; $U(p_j^{\min}, p_j^{\max})$ 为均匀分布函数(即随机生成在区间 $[p_j^{\min}, p_j^{\max}]$ 上的一个数)。

第 2 步, 算法停滞判断。当过去的若干代内(又称为算法停滞门槛次数)种群最优值发生变化时, 执行第 3 步; 否则, 执行第 4 步。

第 3 步, 繁衍。对于每个父代个体, 根据差异进化式(17)产生其子个体。如果得出的 $x'_{i,j}[k]$ 不在区间 $[x_j^{\min}, x_j^{\max}]$ 之中, 此处将采用一种中点微调策略^[12]来修正此个体。重复这个过程直到产生下一代 N_p 个体, 随后转向第 5 步。

$$x'_{i,j}[k+1] = x'_{i,j}[k] + K(x_{best,j} - x'_{i,j}[k]) + F(x'_{r_1,j}[k] - x'_{r_2,j}[k]) \quad (17)$$

式中: r_1 和 r_2 为互不相等且不等于 i 的整数, 从 $1 \sim N_p$ 中随机选取; K 和 F 为缩放系数, 通常在 $[0,1]$ 区间取值; $x_{best,j}$ 标记到当前代为止的最佳个体的第 j 个变量。

第 4 步, 混沌变异。对种群中的每个父代个体, 如果有均匀分布随机数小于变异概率, 则按式(13)~式(15)执行混沌变异。重复这个过程直到产生下一代 N_p 个体。

第 5 步, 评估所有的下一代个体的目标函数值。

第 6 步, 选择。每个子个体都同其父个体竞争, 好的个体保留下来成为下一代的父代。

第 7 步, 重复上述过程, 直到任一算法终止条件满足。

2.4 滇西地区电网 SVC 元件的配置方案确定

选择滇西地区的 220 kV 变电站和 500 kV 黄坪、大理、和平、墨江变电站作为 SVC 设备装设地点的候选集合, 应用第 2.2 节综合优化模型及 2.3 节改进 DE 法进行求解, 得各候选地点上 SVC 的参数、容量及对应的动态指标如表 1 所示。

表 1 各候选地点的 SVC 优化参数、容量及动态指标

Table 1 SVC optimization of parameters, capacity and dynamic index in each candidate location

序号	装设地点	参数							指标值
		T_{S2}	T_{S3}	K_{SVS}	T_{S8}	T_{S9}	K_{S3}	$Q/Mvar$	
1	苏屯	0.36	0.50	11.3	0.43	0.86	2.1	146.0	22.77
2	保山	0.41	0.09	13.0	0.8	0.87	1.4	176.0	23.46
3	迪庆	0.71	0.37	10.0	0.17	0.25	4.0	148.0	25.66
4	福贡	0.23	0.13	19.1	0.08	0.44	3.9	141.0	26.18
5	剑川	0.46	0.06	19.5	0.05	0.34	2.4	174.0	22.23
6	黄坪	0.86	0.30	14.5	0.35	0.99	0.8	57.0	33.93
7	大理	0.15	0.37	16.7	0.93	0.79	1.1	155.0	21.51
8	香变	0.89	0.50	10.8	0.73	0.89	6.7	94.0	30.03
9	丽江	0.46	0.42	19.8	0.88	0.93	5.2	156.0	25.13
10	洱源	0.58	0.45	9.7	0.84	0.68	7.3	120.0	25.27
11	墨江	0.57	0.6	12.5	0.21	0.91	3.9	51.0	31.27
12	和平	0.51	0.8	18.9	0.21	0.12	7.7	62.0	31.52

从表 1 可看出, SVC 装设在 500 kV 大理变的动态性能指标最小, 即: 500 kV 大理变是滇西地区电网单一配置 SVC 的最佳方案。

2.5 滇西地区电网 STATCOM 元件的配置方案确定

选择滇西地区的 220 kV 变电站和 500 kV 黄坪、大理、和平、墨江变电站作为 STATCOM 设备装设

地点的候选集合,应用第 2.2 节综合优化模型及 DE 法进行求解,得各候选地点上 STATCOM 的参数和容量及对应的动态指标如表 2 所示。从表 2 可看出, STATCOM 装设在 500 kV 大理变上的动态性能指标最小,即: 500 kV 大理变是滇西地区电网单一配置 STATCOM 的最佳方案。

表 2 各候选地点上 STATCOM 参数和容量

Table 2 Parameters and capacity of STATCOM in each candidate location

序号	装设地点	参数							指标值
		T_2	T_3	K_D	T_{S8}	T_{S9}	K_{S3}	$Q/Mvar$	
1	苏电	0.25	0.30	0.05	0.69	0.33	0.2	93	20.50
2	保山	0.53	0.09	0.02	0.86	0.52	0.5	64	22.13
3	崇仁	0.8	0.75	0.02	0.16	0.2	2.7	35	26.84
4	迪庆	0.1	0.72	0.03	0.45	0.09	2.1	69	27.65
5	福贡	0.06	0.57	0.03	0.94	0.56	1.8	83	34.10
6	兰坪	0.02	0.87	0.03	0.98	0.11	2.7	48	28.05
7	剑川	0.99	0.05	0.01	0.02	0.15	4.0	100.0	20.86
8	黄坪	0.01	0.43	0.02	0.02	0.89	4.0	68.0	29.40
9	大理	0.10	0.01	0.04	0.87	0.81	0.8	96.0	19.06
10	香变	0.91	0.79	0.01	0.57	0.19	4.2	53.0	29.55
11	丽江	0.91	0.29	0.02	0.04	0.12	2.5	77.0	21.52
12	洱源	0.53	0.17	0.03	0.92	0.83	3.5	51.0	22.09
13	墨江	0.99	0.82	0.02	0.91	0.92	0.3	81.0	24.30
14	和平	0.85	0.85	0.02	0.66	0.19	2.0	75.0	27.43

2.6 滇西地区电网 TCSC 元件的配置方案确定

选择滇西地区的 220 kV 变电站和 500 kV 黄坪、大理、和平、墨江变电站作为 TCSC 设备装设地点的候选集合,应用第 2.2 节综合优化模型及 DE 法进行求解,得各候选地点上 TCSC 的参数和容量及对应的动态指标如表 3 所示。从表 3 可看出, TCSC 装设在“黄坪—仁和”上时动态性能指标最小,即:“黄坪—仁和”线上是滇西地区电网配置 TCSC 的最佳方案。

3 配置单一 FACTS 元件滇西电网动稳水平比较

通过对云南电网进行小扰动和大扰动动态稳定性进行分析可知,制约滇西送出的主要因素是云南电网中存在滇西北对滇西南的振荡模式,该模式的振荡频率为 0.66 Hz 左右,小扰动下该振荡模式的阻尼比为 5.9%,大扰动下该振荡模式的阻尼比为 3%。按前文的方法对滇西电网进行 FACTS 装置最优配

置,各种方案下滇西电网的动态稳定水平如表 4 所示,各种方案下滇西电网的总体送出提高能力如表 5 所示。

表 3 各候选线路上 TCSC 的参数

Table 3 Parameters of TCSC in each candidate location

序号	装设线路	参数					指标值
		K_M	T_{S1}	T_{S2}	T_{S3}	T_{S4}	
1	苏电—大理	0.1	0.01	0.78	0.01	0.87	26.06
2	保山—苏电	0.19	0.03	0.93	0.02	1	30.35
3	迪庆—丽江	0.082	0.04	0.65	0.01	0.75	34.57
4	福贡—兰坪	0.181	0.02	0.86	0.05	1	34.88
5	福贡—剑川	0.043	0.03	0.86	0.01	0.71	33.31
6	兰坪—剑川	0.081	0.02	0.97	0.01	0.72	34.75
7	剑川—黄坪	0.019	0.02	0.95	0.1	1	32.1
8	剑川—洱源	0.012	0.04	0.69	0.08	0.77	34.5
9	黄坪—大理	0.085	0.02	0.54	0.16	0.63	35.8
10	黄坪—仁和	0.01	0.01	0.99	0.01	1	25.1
11	香变—建塘	0.01	0.15	0.55	0.14	0.51	34.41
12	丽江—鹤庆	0.049	0.01	0.78	0.03	0.76	34.54
13	黄坪—洱源	0.096	0.18	0.55	0.04	0.68	34.64
14	洱源—大理	0.086	0.02	0.98	0.04	0.98	33.69
15	崇仁—苏电	0.092	0.05	0.98	0.04	0.61	33.56
16	大理—和平	0.001	0.13	0.92	0.11	0.83	34.17

表 4 单 FACTS 方案下动态稳定水平提高量

Table 4 Dynamic stability levels in the single FACTS scheme

序号	方案	主导模式		
		频率/Hz	阻尼比/%	配置单 FACTS 前后阻尼提高量/%
1	大理变配置 SVC	0.66	6.28	3.28
2	大理变配置 STATCOM	0.66	6.95	3.95
3	黄坪—仁和线配置 TCSC	0.66	4.56	1.56

表 5 各种 FACTS 方案下滇西北地区外送能力对比

Table 5 Transmission capability of Northwest Yunnan in the various FACTS scheme

方案	外送能力提升总量/MW
500 kV 大理变电站 SVC	180
500 kV 大理变电站 STATCOM	205
黄坪—仁和 TCSC	100

从表 4 和表 5 可看出,滇西电网进行最优单 FACTS 配置后,滇西电网的动态稳定水平和滇西电网送出能力均有不同程度提升。其中,500 kV 大理变配置 SVC 后系统的阻尼水平提高了 3.28%,滇西地区外送提高了 180 MW; 500 kV 大理变配置

STATCOM 后系统的阻尼水平提高了 3.95%，滇西地区外送提高了 205 MW；“黄坪—仁和”线上配置 TCSC 后系统的阻尼水平提高了 1.56%，滇西地区外送提高了 100 MW。通过比较，500 kV 大理变电站上配置 STATCOM 效果最好，其次在 500 kV 大理变电站上配置 SVC，在 500 kV 黄坪—仁和线上配置 TCSC 效果最差。因此，500 kV 大理变上配置 STATCOM 是滇西电网配置单 FACTS 的最佳方案。

4 结论

本文以 FACTS 元件的 BPA 模型为基础，建立了同时考虑系统动态稳定性能和 FACTS 动态投资成本的综合优化模型，通过改进差异优化算法求解出滇西电网配置不同类型单一 FACTS 元件的最佳点和容量，其研究方法和结论为云南电网的输电规划提供新的思路和依据。

参考文献

[1] 朱涛, 李玲芳. 2010 年云南电网动态稳定分析报告[R]. 昆明: 云南电力调度控制中心, 2010: 38-46.

[2] 朱涛. 2011 年云南电网动态稳定分析报告[R]. 昆明: 云南电力调度控制中心, 2011: 4-28.

[3] 何大愚. 柔性交流输电系统技术的发展要求其定义更新[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(10): 79-82.
HE Dayu. Development of flexible AC transmission & distribution system technology requires definition renewing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(10): 79-82.

[4] 赵渊, 董力, 谢开贵. FACTS 元件的可靠性成本/效益分析及其优化配置模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 107-114.
ZHAO Yuan, DONG Li, XIE Kaigui. Research on optimal placement of FACTS devices based on reliability cost/benefits analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 107-114.

[5] 王雅婷, 郑彬, 申洪, 等. 西北新能源外送系统多 FACTS 协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 162-170.
WANG Yating, ZHENG Bin, SHEN Hong, et al. A coordinated control method of multiple FACTS on the Northwest new energy-delivery system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 162-170.

[6] 黄柳强, 郭剑波, 徐式蕴, 等. 适用于多工况的多 FACTS 广域协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 1-8.

HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, XU Shiyun, et al. Wide-area multi-FACTS coordinated control strategy for multiple load cases[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 1-8.

[7] 黄柳强, 郭剑波, 卜广全, 等. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 138-147.
HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, BU Guangquan, et al. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 138-147.

[8] 张延迟, 解大, 任涛, 等. 并行控制结构的静止无功补偿器设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 53-56.
ZHANG Yanchi, XIE Da, REN Tao, et al. Design and implementation of parallel controlled SVC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 53-56.

[9] PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册(4. 10 版)[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008: 223-248.

[10] 章勇高, 康勇, 刘黎明, 等. 静止同步补偿器的双环控制系统设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 62-66.
ZHANG Yonggao, KANG Yong, LIU Liming, et al. Double-loop control design of STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 62-66.

[11] 郑旭, 裴志宏, 孙海顺, 等. 可控串补动模装置研制及阻抗特性研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 50-53.
ZHENG Xu, PEI Zhihong, SUN Haishun, et al. Design and implement of dynamic simulation system of TCSC and study on resistance characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 50-53.

[12] LIU B, WANG L, JIN Y H, et al. Directing orbits of chaotic systems by particle swarm optimization[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2006, 29(2): 454-461.

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-04-05

作者简介:

朱涛(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制、电网调度自动化方面的研究工作; E-mail: taozh78@163.com

段荣华(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与运行管理工作;

汪震(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、新能源应用等。

(编辑 周金梅)