

基于自适应遗传算法的移相器优化计算

孙文多

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决“电力输电网潮流输送不均衡”等问题,将作为柔性交流输电技术之一的移相器应用到电网优化中。在分析其原理及作用的基础上,对移相器的电网优化选址问题进行了研究,提出了一种“能够反映移相器调控效果并解决电网中部分断面的重载、过载问题,提高电网送电安全性”的选址优化方法,该方法采用基于潮流裕度的初选和基于通道利用率的定址两步进行优化。对 IEEE57 节点电网典型运行方式下的移相器进行了计算。研究表明,所述的指标和方法是高效和合理的,也同时表明了移相器对系统可靠性具有重大的改善作用。

关键词:移相器;可靠性;潮流裕度;自适应遗传算法;优化计算

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)07-0901-04

Optimal phase shifter calculation based on adaptive genetic algorithm

SUN Wen-duo

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of unbalanced power transmission on grids, one of flexible AC transmission system; phase shifter was investigated. On the basis of analyzing its principles and applications, the site selection of phase shifter optimization was researched. The method for site selection based on resolving over-load or heavy-load of power grid was put forward, this method was divided by two steps: preliminary screening based on power flow margin and site selection based on utilizing rate of transmission lines. The analysis result of site selection optimization for IEEE57 bus system under typical operating mode shows that the proposed index and method are highly efficient and valid, and shows the system reliability can be greatly improved.

Key words: phase shifter; reliability; power flow margin; adaptive genetic algorithm; optimal calculation

0 引 言

随着电力系统区域联网的形成,往往出现某电源群通过多个送电通道实现电力外送的情形,由于这些通道的输电距离和在电网中的位置分布存在差异,会出现各通道的功率输送不均衡(即送电通道中的某一条或几条线路已经到达极限,而其他线路却处于轻载运行)的情况,从而使整个断面的送电能力受到限制,影响了电网的正常送电。

因此,合理地控制潮流分布已成为电力系统领域的一个重要课题。多年来,国内外已对移相器(Phase Shifter/Phase Shifting Transformer)进行了一定研究,证明移相器能够有效控制电网潮流,解决线路过载问题。

目前,世界上投入电力系统运行的大型移相变压器已有数十台。现已知的移相器最高额定电压为 525 kV,安装于美国 Arizona 州 Westwing 变电站 Westwing-Mead 线路,用于控制该线路潮流,消除与之并联的 500 kV 线路串联电容器的过负荷,使 500 kV 输电系统的输送能力得到充分利用。

常见的移相器优化方法有潮流裕度变化量与移相角之比的灵敏度指标移相器选址^[1-2],但不能用于解决实际电网中的多断面重载问题;实际电网应用分析选址^[3-4],由于装设可行点较少,很难具有推广意义;基于负荷削减模型的优化^[5-6],即以安装移相器前后的线路潮流差作为指标,考虑到了移相后的潮流均衡问题,但潮流数值上的均衡并不总是合理的指标。

本研究基于以上方法提出合适的指标及优化算法进行移相器优化计算研究,且考虑到电网潮流均衡性及安全性,以期为实际电网消除重载、过载断面提供一种有效的分析手段。

1 移相器基本原理及作用

对于输电线路,其输送的有功功率可以简单地用下式表示:

$$P = \frac{|U_1| |U_2|}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (1)$$

理想状态下,移相变压器只改变电压相角 σ ,而不改变电压幅值,且受端系统与发端系统电压大小相等,则安装移相器后移相器功角特性为^[7-8]:

$$\begin{cases} P = \frac{U^2}{X} \sin(\delta + \sigma) \\ Q = \frac{U^2}{X} [1 - \cos(\delta + \sigma)] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 。以下用例子说明移相器的作用,如图 1 所示。该图表示一个 1 机 2 节点简单电网,电网供求平衡,假设输电线路 A、B 为同型号线路,根据潮流自然分布的特性,显然较短的潮流通道 A 将通过相比 B 重得多的潮流,从而可能影响电网安全性。通过在 A 处装设移相器并适当调整移相角可以使潮流分布更加均匀,有利于电网安全性的提高。

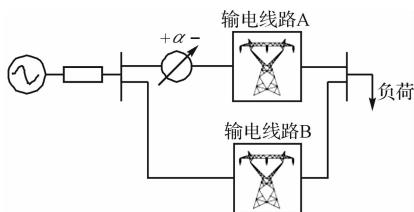


图 1 单机 2 节点电网

2 移相器优化计算

2.1 基本思路

移相变压器并不改变电网出力及负荷,故移相器对重载线路的调节必然伴随着其他线路潮流的升高。基于理想情况,在某个重负荷运行方式下(如夏季尖峰方式)必然希望能够通过控制以使重载断面的潮流能均匀地分布到各轻载断面中,而非仅基于移相器控制灵敏度的考虑。因此本研究在对特定位置的移相角优化时,提出了通道利用率作为优化指标,以期能够达到潮流均匀分布的目的。

由于移相器的投资较大,装设不同数量的移相变压器在实际投资数额上将产生巨大的差异,因此在优

化选址过程中,总是希望能以安装最少的移相器数目以达到减轻一个或多个重载断面潮流的目标。计算过程中本研究首先设定移相器投入数 $m = 1$,即仅在一处装设移相器,只有当 $m = 1$ 无法满足要求时,才考虑增加投入数。

2.2 优化指标

在正常情况下,系统负载的严重程度可以用断面通道利用率的概念来表征,根据移相器特点,定义优化目标如下:

$$\min T_j = \sum_{i \in S} \varepsilon_i \left(\frac{P_{ij}}{P_{imax}} \right)^n \quad (3)$$

式中: P_{ij} —在 j 策略下, i 断面流过的有功潮流; P_{imax} — i 断面的额定有功潮流; P_{ij}/P_{imax} —表征通道利用率; n —指数系数,在计算中应取 $n > 1$; ε_i —加权系数,即反映断面 i 重要性的权重系数; S —优化计算中的关注断面集合。

此优化目标直观地将实际通道潮流与其对应潮流极限相对应比较,包含了系统断面阻塞和系统潮流均衡的信息。

2.3 自适应遗传算法

目前已有很多遗传算法(GA)在电力系统中的应用,特别是在电力系统运行领域。遗传算法应用于工程实践的主要困难就在于群体容易过早收敛,也就是说,GA 在许多情况下得到的解往往是局部最优解,而不是全局最优解。为了避免过早收敛、改善算法收敛性,常常采用适当的交叉和变异操作来提高遗传算法的性能^[9]。

自适应遗传算法是由标准遗传算法发展而来,在控制 GA 的运行中,交叉率(pc)、变异率(pm)的重要性在 GA 的研究中已经得到公认。 pc 值大,新的结果引入到种群的速度就越快。但随着 pc 值的增加,优良个体结果则不容易被保留。变异则是提高 GA 适应度的一种方式,然而 pm 的选择也会对 GA 性能产生重大的影响。

自适应遗传算法的关键思想就是根据每代种群中的适应值的统计,去适应交叉和变异的概率。当群体中各个体的适应度趋于一致或者趋于局部最优时,使 pc 和 pm 增加,而当群体适应度比较分散时,使 pc 与 pm 减小。同时,对于适应值高于群体平均适应值的个体,对应于较低的 pc 与 pm ,使个体得以保护进入下一代;而低于平均适应值的个体,相对应于较高的 pc 与 pm ,使该个体被淘汰。因此自适应的 pc 与 pm 能够提供相对某个解的最佳交叉率与变异率。根据以上结论定义

新的 p_c, p_m 采用下列形式^[10-11]:

$$p_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f_c)/(f_{\max} - \bar{f}), f_c > \bar{f} \\ k_3, f_c \leq \bar{f} \end{cases} \quad (4)$$

$$p_m = \begin{cases} k_2(f_{\max} - f_i)/(f_{\max} - \bar{f}), f_i > \bar{f} \\ k_4, f_i \leq \bar{f} \end{cases} \quad (5)$$

其中,为限制 p_c, p_m 的取值在 0 ~ 1 之间, $k_1 \sim k_4$ 取值需小于 1, f_c 为被选交叉的两个个体中,适应值较大的一个, f_i 为第 i 个个体的适应值。

2.4 基于潮流裕度的可行线筛选

理论上,在优化过程中,目标电网所有断面都应该成为待选断面进行优化计算,但如此产生的计算量将会十分巨大。事实上许多断面的计算是无意义的,在这些断面上安装移相器往往很难对目标重载断面产生足够的影响,于是如何寻求合适的方法筛去这部分无效断面就成为一个重要的问题。

文献[1]中提出的采用受控线路潮流裕度的概念虽然用于实现安装位置的确定并不尽如意,但经过一定的修改后,则能成为一个优秀的筛选指标。文中定义:

$$P_{ydi} = P_{\max} - P_{\text{conti}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中: P_{\max} —重点受控线路,即重载断面的功率上限值; P_{conti} —移相器安装于第 i 个位置时,受控线路功率值。

在进行可行性筛选的过程中,需要对试验移相器的移相角固定在某一合适的角度以进行量化比较,于是式(6)改写为:

$$P_{ydi*} = P_{\max} - P_{i, \text{ang} \pm 5} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: $P_{i, \text{ang} \pm 5}$ —固定移相角为 5° 时,目标断面的潮流; “ \pm ”—移相角可以为正向或负向移动,判断依据为是否减小目标断面潮流。

此时受控线路潮流裕度指标 P_{ydi*} 意义转变为移相器安装于第 i 个位置时,移相 5° 后对目标断面的影响量。该指标清晰反映了不同安装位置移相器的调控效果。对于目标重载线路来说,初选情况下 P_{ydi*} 越大越好,而对于 P_{ydi*} 较小的情况,则可以删去优化待选断面集中的对应位置。

2.5 优化流程

移相器优化流程如图 2 所示。

3 算例分析

本研究采用 IEEE57 典型节点系统进行仿真。假设每条线路短时有功物理限额为 150 MW,则在当前

典型运行方式下,断面 8-9、1-15 发生过载,断面 1-2、1-17 重载,如表 1 所示。

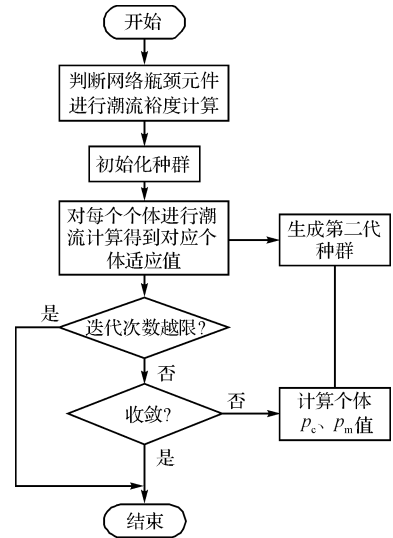


图 2 移相器优化流程

表 1 IEEE57 节点电网潮流分析结果

序号	断面	P/MW	性质
1	8-9	176.6	过载
2	1-15	150.5	过载
3	1-2	102.6	重载
4	1-17	92.5	重载

无优化运行方式下该电网 4 个严重的重载、过载情况如表 1 所示。由表中数据选择此 4 条线路作为瓶颈元件进行装设移相器后的潮流裕度计算。

表 2 IEEE57 节点电网潮流裕度计算结果

P_{ydi*}	1-2	1-15	1-17	8-9
1-2	92.05	19.86	61.02	-21.66
1-15	65.15	56.42	63.15	-27.91
1-16	52.92	9.16	62.9	-25.85
1-17	52.77	8.9	83.89	-25.91
3-4	55.65	1.72	59.23	-8.49
3-15	77.93	21.84	59.07	-16.99
4-6	51.54	1.22	58.21	-16.83
6-7	51.04	1.25	58.03	-21.06
6-8	50.59	1.08	58.06	-18.07
7-8	49.85	0.79	58.01	-14.93
8-9	55.03	1.0	58.35	9.5
9-11	48.67	2.44	56.88	-20.95
9-12	49.92	2.81	58.59	-24.4
10-12	50.01	3.4	59.18	-25.39
11-13	48.69	2.25	56.72	-22.04
13-15	49.93	10.07	61.49	-22.37
13-49	48.41	1.66	56.95	-26.44
14-15	49.6	9.51	60.72	-23.67
21-22	48.46	1.25	56.8	-27.47
24-26	48.36	1.38	56.69	-24.08
36-37	47.87	1.18	56.7	-27.97
49-50	48.22	2.18	57.5	-26.62

IEEE57 节点电网部分断面潮流裕度计算结果如表 2 所示。将每列,即每个瓶颈元件 $P_{y_{di}^*}$ 值最大的 5 个列出,如表 3 所示。

表 3 潮流裕度计算选择结果

$P_{y_{di}^*}$	1-2	1-15	1-17	8-9
1	92.05	56.42	83.89	9.5
位置	1-2	1-15	1-17	8-9
2	77.93	21.84	63.15	-8.49
位置	3-5	3-15	1-15	3-4
3	65.15	19.86	62.9	-14.93
位置	1-15	1-2	1-16	7-8
4	55.65	10.07	61.49	-16.83
位置	3-4	13-15	13-15	4-6
5	55.03	9.51	61.02	-16.99
位置	8-9	14-15	1-2	3-15

根据表 3 中 4×5 条线路,去除重复线路后,可得 1-2,1-15,1-16,1-17,3-4,3-15,4-6,7-8,8-9,13-15,14-15,共 11 条可行线路被选出,计入待选断面集进行优化计算。

本研究结合以上优化思想及计算方案,基于 BPA4.1 计算平台及其自带移相器模型,使用 python 语言编写了优化程序并进行计算。种群个体数设置为 12,电网中装设两台移相器,移相器优化范围为 $+12^\circ \sim -12^\circ$ 并以 0.5° 为最小步长,即移相器安装点及其移相角度均为离散变量。在优化中,本研究设置指数系数 $n=2$ 。未经优化时 IEEE57 电网根据式(3)计算适应值 $T_0=4.486$ (适应值计算及电网中 22 条重点线路),且存在较为严重的重载、过载问题,采用自适应遗传算法优化计算后的结果如表 4、表 5 所示。

表 4 IEEE57 节点电网优化结果

	安装点 1 及角度		安装点 2 及角度		T_j
AGA	8-9	6.5	1-16	-12.0	3.96

表 5 优化后重点线路潮流

序号	断面	P/MW
1	8-9	129.3
2	1-15	129.5
3	1-2	80.9
4	1-17	82.1

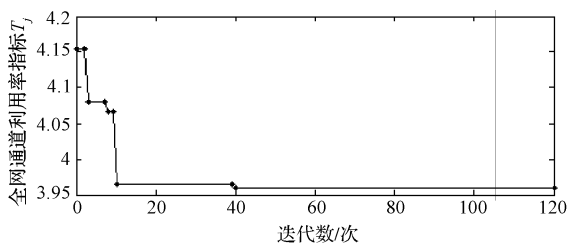


图 3 AGA 收敛曲线

即在当前运行方式下,通过在 8-9,1-16 线路处安装移相器并分别移相 $6.5^\circ, -12^\circ$ 可以提升该地区电网安全性:通道利用率指标从 4.486 降低至 3.96,消除了过载线路,减轻了重载线路潮流(AGA 收敛曲线如图 3 所示)。

4 结束语

本研究分析了移相器的特性及其应用范围,提出了筛选移相器候选安装位置的指标及后续的优化目标,并采用了合适的算法对其展开优化计算。

笔者以 IEEE57 节点电网为例进行优化分析的计算结果表明,应用本研究所提出的指标及方法计算可以准确地寻找到合适的移相器安装位置及移相角度,有效解决电网重载、过载安全问题,提高电网安全性,使已有电网输电能力得到充分利用。

参考文献(References):

- [1] 曲祖义,廖华兴,于继来,等.消除线路过载现象的移相变压器选址问题研究[J].电网技术,2002,26(12):30-32,44.
- [2] 郝帅,高沁翔,伏松平,等.合理利用线路的移相变压器选址问题研究[J].微计算机信息,2009,25(9):305-306,182.
- [3] 赵学强,郭明星.华东电网安装移项变压器的研究[J].华东电力,2006,34(11):30-34.
- [4] VERBOOMEN J, VAN H D, SCHAVEMAKER P H, et al. Phase Shifting Transformers: Principles and Applications [C]//Future Power Systems, 2005 International Conference on Digital Object Identifier. Amsterdam:[s. n.],2005:1-6.
- [5] 赵渊,周家启.静止无功补偿器和移相器的最优配置及其对发输电系统可靠性的影响[J].电工技术学报,2004,19(1):55-60.
- [6] MOMOH J A, ZHU J Z, BOSWELL G D, et al. Power system security enhancement by OPF with phase shifter[J]. IEEE Transaction on Power Systems,2001,16(2):287-293.
- [7] 周孝信,卢强,杨奇逊,等.中国电气工程大典(第8卷):电力系统工程[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [8] 谢小荣,姜齐荣.柔性交流输电的原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [9] WU Q H, CAO Y J, WEN J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Electrical Power & Energy Systems,1998,20(8):563-569.
- [10] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transaction on Power Systems,1994,24(2):656-667.
- [11] 张京钊,江涛.改进的自适应遗传算法[J].计算机工程与应用,2010,46(11):53-55.