

[无功补偿]

交直流电网动态无功补偿 优化配置研究

文/刘禹初
中油电能供电公司变电检修部

针对电网拓扑结构、交直流系统的准稳态特点和系统运行瞬态等特点，提出一种基于交直流电网特点的多阶段动态无功分配方案。在分析交流-直流系统无功电压敏感性的基础上，结合直流系统的工作特点，得出了评价节点电压稳定性的相关程度，并在此基础上，给出了一种基于无功补偿分配分区的方案。通过模拟和计算，证明了该方法的正确性，对交直流输电系统的动态无功补偿装置的规划和布置具有一定的借鉴意义。

随着电力网络的不断发展，电力系统间的联系也日益密切。例如，将交流输电线路与两个只有直流输电线路相连的不同步网络进行并联，构成AC-DC并联；由于对HVDC的要求，建立了一个多端的DC输出系统；越来越多的直流输电线路与交流电网相连，构成多馈直流系统。采用直流输电技术解决了能量分配和能耗分配的矛盾，但由于网络连接方式的复杂性，使得电网的稳定性问题更加突出。

并联型FACTS设备提高电网稳定运行有效性分析

随着现代电网的发展，电网的结构、运行任务的繁重，对电网的安全、可靠及经济运行提出了更高的要求。但是，由于传统的机械控制方式存在很大的缺陷，使得系统的可控性差，系统的稳定程度较低，从而使输送的电力很难调整，传输装置的利用率也不高。随着FACTS技术在电力行业中的迅速发展，至今已经有近20种FACTS控制器被开发出来，其他几种早期开发的FACTS控制器已经开始商业化，但还有待于进一步的研究和分析。

1. 并联补偿器基本原理

并联补偿式FACTS控制器（简称并联补偿器）是一种在连接点注入到系统中的电流源，通过改变其输出电流的幅度和相位，可以改变输入到系统中的无功或有功，并且对各节点进行补偿，使得相邻的某一地区都能得到好处，从而具有更好的维护效果。

它的布置形式一般有两种：一种是在电力系统中的电力接收端（负载端）；另一种是在较长的电力线上设置的变电站。由于大部分负载的功率因数都是滞后的，所以在负载节点上引入并联补偿，可以补偿负载的无功，增加负载的功率因数，从而可以有效地改善系统的电压稳定性。同时，对于系统的暂态稳定，若在长线传输中进行并联补偿，可以显著地改善故障周期或后功角度特征曲线，既增加了系统的传送能力，又增加了暂态稳定性。

如果不考虑并联补偿式控制器的内耗，则并联无功补偿不能产生或吸收有功，而是通过改变输出量或电容的无功来控制网络的电压，从而影响系统的工作性能。

2. SVC与STATCOM功能性比较分析

无论是SVC还是STATCOM，都是并联的。

SVC是一种以晶闸管为基础的/断路器,主要功能是通过控制其断开时间,改变受控电抗或电容器的等效阻抗,从而实现对并联无功的调整。

在正常工作条件下,SVC和STATCOM根据设置的坡度,在AB和A'B'两部分进行平滑调整。其中一个差异是,两种控制器均为满载状态,SVC为全负载状态下的电压,其最大输出补偿电流随系统电压的二次方成比例线性变化。而STATCOM的最大输出补偿电流与系统电压无关,且与系统电压呈线性关系,即使在低压工作时也能保持全时补偿,且输出的功率比SVC高。当大干扰时,STATCOM的电压偏差超过了控制的线性范围,且在电压突然下降时,STATCOM比SVC具有更好的电压支持性能。另一个差异是瞬时过载,因为SVC的电容器和电抗器容量是严格限定的,所以瞬时过电流很少,而STATCOM的瞬时过电流是由功率电子设备的最大短路电流所决定的。许多研究显示,当电网发生故障时,STATCOM电压下降,其补偿能力相当于其容量的1.2~1.3倍。在响应速度方面,由于SVC的过零会导致其开环的传输时延大,通常为40 ms;而STATCOM采用GTO等设备,其开环响应时间基本不受系统性能影响,且采用多种优化控制方式,开环响应时间可缩短至10 ms。然而,由于功率电子设备在STATCOM中的应用,使得其开发费用比采用常规性能设备的SVC要高。

3. 并联补偿技术稳定电网运行的有效性

(1) 系统电气参数

若不考虑并联补偿器的控制,可将其等同为带电抗的并联可控电流。接入电网后,会对雅可比矩阵产生一定的影响。利用雅可比矩阵在稳态运行点上的特征值分解,消除不关心的母线,把电压相关的负载纳入雅可比矩阵,并在不考虑有功功率的细微变化的情况下,求出母线电压幅度的变化量与母线电压的振幅变化量之间的关系,找出电压稳定的薄弱环节。采用并联调速装置的柔性控制功能,能够有效地降低系统的初期不稳定隐患,提高电网的电压稳定性。

(2) 电压稳定裕度

并联补偿装置可以通过对电网中各装置进行快速的电感和电容式无功功率的输出,改善单台输电装置的运载容量,克服系统的稳定性限制。能够减

轻系统在运行时因负载或传送功率增大而导致电压崩溃的情况,提高了电压的稳定性。

(3) 暂态稳定裕度

从广义等面积方法的观点来看,当系统的参数或结构发生改变时,会对系统的暂态稳定性产生直接的影响。并联补偿器具有快速的控制响应能力,可以对系统的干扰作出快速的反应,甚至可以调整某些高频的动态过程。并联补偿装置能够在任意时刻重复调整,并且能够持续地进行调整,使其能够在工作区域内不断地调整电力系统的各项参数。它主要是在一定的容量范围内对无功进行补偿,降低了线路上的无功,增加了输电线路的有功功率,提高了系统的暂态稳定性。

(4) 系统动态性能

超调量、转换时间及转换振荡次数是衡量系统动力学性能的重要指标。超调是指系统发生大干扰后,当系统初始恢复时,系统的状态量超过最后的稳定状态。转换时间是指从干扰出现到系统基本稳定的时间;转换振荡次数是指系统在转换过程中的振动次数。在输电线路中采用并联补偿器,在一定的范围内对电网的节点电压进行调整,实现对系统的功率控制,缩短了系统的转换周期,在某种程度上减小了超调量,减小了系统的运行状态,例如电压的振荡。

交直流电网电压失稳关键事件及筛选

1. 暂态电压越限衡量指标

电网受干扰较大时,各点的暂态稳压形式与可靠度电压指数进行比较。

根据《电力系统安全稳定导则》第334号规定的静态稳定值,在事故后的工作状态下,用 dQ/dU 判据得到的稳定值 K 不能小于8%;在非同步操作过程中,与主要用户连接的主站和变电所的母线电压波动最小不得低于75%。这一稳定性储备指数可以用来确定可靠的电压指标。瞬时电压的越界积分的表达式为

$$V_1(t) = \frac{\left(\frac{t}{t_c} e^{\frac{t}{t_c}}\right)}{e^{\beta}} v_s, \forall t \in [t_s, t_g] \quad (1)$$

式中, t_s 是故障切除时刻; t_c 是计算中止时刻; β 是积分常数。

采用与式(1)相似的瞬时电压越限积分法,通过对不同故障后的电压超过暂态稳定极限进行积分,可以评估不同故障对各节点的影响,从而反映出系统电压不稳的严重程度。所以,瞬时电压的越界积分TVI的表达公式为

$$TVI = \int_{t_s}^{t_e} v_V(t) dt \quad (2)$$

$$v_V(t) = \begin{cases} v(t) - V_{u(t)} & v(t) > V_{u(t)} \\ V_l(t) - v(t) & v(t) < V_l(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在对交流直流电网电压不稳定的严重程度进行分析时,必须考虑直流输电系统的换相故障。当逆变器在 18° 熄弧先进角时,其电压通常会降低 $10\% \sim 45\%$,如果更换不成功,则需一至二次循环才能消除;然后用换流器对直流电压进行调整,逐步恢复输电的有功。所以,在瞬时电压越限分析中,如果将以上所提到的故障叠加起来,会导致直流输电系统的换相失效,将重点选择三相短路、变电站主变压器和电力公司的大干扰。

2. 采用相关性理论形成严重故障集

对各种故障类型下的各母线电压TVI进行分析,并通过相关理论进行研究。两种不同的失效形式都可以看作是两种不同的变数,探讨了故障引起的整个系统的电压变动程度之间的关系,反映了两种不同的数量下降形式是否为“类似”的故障。当相关系数的绝对值在 $0.7 \sim 1.0$ 的范围内时,一般视为高相关性;在 $0.3 \sim 0.7$ 的范围内,可视为二者有中度的相关;在 $0 \sim 0.3$ 范围内,视为较低的相关性。

动态无功补偿多目标优化配置方案

本论文以SVC及STATCOM为主要参数,进行了仿真分析。

1. SVC模型

实际应用中,SVC包括感性分支和容性支路,其中至少有一小部分是可控制的。可控的感性分支通常是晶闸管控制反应器(TCR),而可控容性支路通常是晶闸管投切电容(TSC)。只有TCR控制的SVC,从额定感性无功向电容无功调整时,TCR必须是额定功率的2倍,导致了设备容量的浪费;在可控段,仅有TSC的SVC能提供梯次可变的无功,

且不具有连续性。这两个缺陷可以通过将两者结合而构成晶闸管投切电容器-晶闸管控制电抗式无功补偿装置(TSC-TCR)加以解决。

2. STATCOM模型

STATCOM的主要电路由一个电容构成。该电容是一个能量存储单元,一个电压源转换器(VSHC),该转换器是由一个电抗(或者一个变压器)与该系统相连。

3. 动态无功补偿配置方法

首先,通过对系统结构的分析,评价各节点的电压稳定性的相关性,减少各节点的布设位置,并大致确定各布点的位置和数目,将交直流电网的最优配置问题逐渐简化为一个小区域的动态无功补偿优化配置问题。

然后,利用暂态稳定性分析,对大干扰的地区电网进行分析,从中筛选出区域电网中的电压不稳临界事件。

最后,将改进的帝国竞争算法应用于不同地区电网中,对多目标优化问题进行研究,得出了交直流系统动态无功补偿的最佳分配方案。

结束语

目前关于电力系统动态无功补偿的最优分配问题大多是以交流电网为基础,并未将其纳入其中。电网在大干扰后出现的不稳定事故,主要是因为某些节点的电压突然降低,造成了无法控制的连锁事故。动态无功补偿技术可以满足直流电网电压稳定的快速调整要求,通过优化相应的设备,可以提高系统的性能。EA

(收稿日期: 2022-07-20)

参考文献

- [1] 谭军,张新征,张露维,等. 低压无功补偿兼消谐装置的启用与停用[J]. 电气应用, 2021, 40(7): 55-61.
- [2] 高正男,孙辉,王顺江,等. 考虑电网潮流分布的输电线路动态参数估计方法[J]. 电气应用, 2020, 39(6): 12-17.
- [3] 冯小飞,王强,李东玲. 一种直流变换器线损补偿电路的设计[J]. 电气应用, 2020, 39(11): 49-53.