



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106655293 A

(43)申请公布日 2017. 05. 10

(21)申请号 201611054068.3

(22)申请日 2016.11.25

(71)申请人 国网河南省电力公司电力科学研究院

地址 450052 河南省郑州市嵩山南路85号

申请人 华中科技大学 国家电网公司

(72)发明人 雷俊哲 张振安 李程昊 赵华
赵阳 郝元钊 方舟 王建波
刘畅 姚伟

(74)专利代理机构 郑州知己知识产权代理有限公司 41132

代理人 季发军

(51) Int. Cl.

H02J 5/00(2016.01)

H02J 3/18(2006.01)

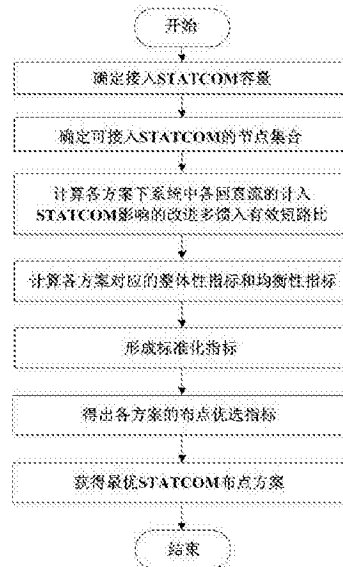
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法

(57)摘要

本发明公开了一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,该方法首先确定接入STATCOM的容量和可接入STATCOM的节点集合,形成STATCOM布点方案集合;接着计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比;利用计算结果计算各方案对应的整体性指标和均衡性指标;并将上述指标归一化为标准化整体性指标及标准化均衡性指标,求得各方案的布点优选指标;最后根据各方案的布点优选指标获得最优STATCOM布点方案。本发明以提高多馈入交直流混联系统的电压稳定性为目标,为电网规划人员对多馈入交直流混联系统中STATCOM的布点选择提供参考依据。



1. 一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于:根据不同STATCOM布点方案的整体性指标和均衡性指标,通过数学计算选择STATCOM的安装位置,以提高系统电压稳定性。

2. 根据权利要求1所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述布点选择方法不需要仿真分析。

3. 根据权利要求1或2所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述数学计算包括计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的多馈入有效短路比。

4. 根据权利要求3所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述多馈入有效短路比的计算,依赖于STATCOM容量及装设地点与直流落点之间的电气距离,还依赖于系统中并联电容器容量及装设地点与直流落点之间的电气距离。

5. 根据权利要求1或2所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述布点选择方法包括以下步骤:

(1) 在有n个节点,其中发电机节点d个,直流落点k个的多馈入交直流混联电网中,确定装设STATCOM的容量为 Q_s ;

(2) 确定可接入STATCOM的节点集合为除发电机节点以外的其余n-d个节点,即形成n-d个布点方案;

(3) 计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比 I_{MESCR_m} , $i=1, 2, \dots, n-d, m=1, 2, \dots, k$;

(4) 计算各方案对应的整体性指标 $I_{sum}(i)$ 和均衡性指标 $I_{bal}(i)$;

(5) 计算各方案对应的标准化整体性指标 $\hat{I}_{sum}(i)$ 和标准化均衡性指标 $\hat{I}_{bal}(i)$;

(6) 利用公式 $I(i) = 0.5\hat{I}_{sum}(i) + 0.5\hat{I}_{bal}(i)$ 形成各方案的优选指标,式中 $I(i)$ 表示方案 i 的优选指标;

(7) 选择布点优选指标最大的方案作为最优的STATCOM布点方案;

其中,n、d、k都是自然数。

6. 根据权利要求5中所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述步骤(3)中计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比包括以下步骤:

(1) 按照该布点方案接入容量为 Q_s 的STATCOM;

(2) 计算k条直流线路两两之间的多馈入交互因子 $MIF_{jm} = \frac{Z_{mj}}{Z_{mm}}$, $j=1, 2, \dots, k, m=1, 2, \dots, k$, 其中 Z_{mj} 为第m回直流所接节点与第j回直流所接节点的互阻抗, Z_{mm} 为第m回直流所接节点的自阻抗;

(3) 利用公式 $I_{MESCR_m} = \frac{S_{acm} + \sum_{l=1}^n \frac{Z_{ml}}{Z_{mm}} (Q_{Sl} - Q_{cl})}{P_{dm} + \sum_{j=1, j \neq m}^k MIF_{jm} \cdot P_{dj}}$, 计算第i个布点方案下系统第m回

直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比 $I_{IMESCR_{im}}$,其中, $i=1,2,\dots,n-d,j=1,2,\dots,k,m=1,2,\dots,k,l=1,2,\dots,n$, S_{acm} 表示第m回直流所接交流母线的短路容量, Z_{m1} 为第m回直流所接节点与节点1的互阻抗, Z_{mm} 为第m回直流所接节点的自阻抗, Q_{c1} 为节点1上并联的电容量, Q_{s1i} 为第i个布点方案下,节点1上连接的STATCOM容量, P_{dm} 为第m回直流的额定功率, P_{aj} 为第j回直流的额定功率。

7.根据权利要求5中所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述步骤(4)中计算各方案对应的整体性指标和均衡性指标包括以下步骤:

(1)利用公式 $I_{sum}(i) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{IMESCR_{im}}$ 计算每一个布点方案的整体性指标 $I_{sum}(i)$,其中 $i=1,2,\dots,n-d$ 对应STATCOM不同布点的方案; k 为系统中的直流回数, $I_{IMESCR_{im}}$ 为第i个STATCOM布点方案下第m回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比;

(2)利用公式 $\bar{I}_{IMESCR}(i) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{IMESCR_{im}}$ 和公式 $I_{bal}(i) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{m=1}^k (I_{IMESCR_{im}} - \bar{I}_{IMESCR}(i))^2}$ 计算每一个布点方案的均衡性指标 $I_{bal}(i)$ 。

8.根据权利要求5中所述的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于,所述步骤(5)中计算各方案对应的标准化整体性指标和标准化均衡性指标包括以下步骤:

(1)利用公式 $\hat{I}_{sum}(i) = \frac{I_{sum}(i) - \min I_{sum}}{\max I_{sum} - \min I_{sum}}$, $i=1,2,\dots,n-d$,形成第i个STATCOM布点方案的标准化整体性指标,其中, $\max I_{sum}$ 表示所有布点方案中最大的整体性指标, $\min I_{sum}$ 表示所有布点方案中最小的整体性指标;

(2)利用公式 $\hat{I}_{bal}(i) = \frac{\max I_{bal} - I_{bal}(i)}{\max I_{bal} - \min I_{bal}}$ ($i=1,2,\dots,n-d$)形成第i个

STATCOM布点方案的标准化均衡性指标,其中, $\max I_{bal}$ 表示所有布点方案中最大的均衡性指标, $\min I_{bal}$ 表示所有布点方案中最小的均衡性指标。

一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统规划领域,更具体地,涉及一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法。

背景技术

[0002] 随着直流输电技术的快速发展,我国在特高压直流输电工程建设方面已经成为世界第一大国,拥有目前世界上最多的高压直流输电工程。随着我国直流工程的相继投运,出现了多条高压直流输电线路接入同一地区的电网结构。这些电气距离较近的直流线路与所馈入的交流电网共同形成了多馈入交直流系统。直流输电为受端电网提供有功的同时,也消耗着大量的无功功率,高压直流输电传输容量在系统中所占比例越来越大,相对的交流系统变得较弱,这使得与高压直流输电相连的受端交流系统的电压稳定性问题日益突出。提高受端交流系统电压稳定性的途径之一是在交流系统中合适的位置装设无功补偿装置。

[0003] 静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)是一种能够用于交直流混联系统的性能优良的无功补偿设备。基于电压源换流技术的STATCOM与传统的无功补偿装置相比,具有调节连续,谐波小,损耗低,运行范围宽,可靠性高,调节速度快等优点。许多学者考虑将其接入到直流输电逆变侧的交流母线,来改善其交流母线电压的稳定性。由于在多馈入交直流系统中,存在多个直流落点,多回直流线路之间、直流线路与交流系统之间均存在耦合关系,因此STATCOM的配置地点难以选择,在多馈入交直流系统中,如何配置STATCOM以提高系统电压稳定性是值得研究的问题。

[0004] 对于STATCOM的配置问题,工程上一般通过对多个备选方案,开展仿真分析,进行技术经济综合比选,择优确定配置方案,然而这种方法确定的方案优劣很大程度上依赖于研究人员的经验。所以,对于多直流馈入的情况,STATCOM安装位置的研究需要指标衡量,并结合数学优化的方法来进行研究,从而为电网规划人员配置STATCOM提供参考依据,使系统中装设的STATCOM能够最大程度地提高电压稳定性。

发明内容

[0005] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供了一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其目的在于解决现有多馈入交直流混联系统中STATCOM布点方法有赖于仿真和研究人员经验的问题。

[0006] 为解决上述问题,本发明提供一种多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法,其特征在于:根据不同STATCOM布点方案的整体性指标和均衡性指标,通过数学计算选择STATCOM的安装位置,以提高系统电压稳定性。

[0007] 所述布点选择方法不需要仿真分析。

[0008] 所述数学计算包括计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的多馈入有效短路比。

[0009] 所述多馈入有效短路比的计算,依赖于STATCOM容量及装设地点与直流落点之间

的电气距离,还依赖于系统中并联电容器容量及装设地点与直流落点之间的电气距离。

[0010] 所述布点选择方法包括以下步骤:

[0011] (1) 在有n个节点,其中发电机节点d个,直流落点k个的多馈入交直流混联电网中,确定装设STATCOM的容量为 Q_s ;

[0012] (2) 确定可接入STATCOM的节点集合为除发电机节点以外的其余n-d个节点,即形成n-d个布点方案;

[0013] (3) 计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比 I_{MESCR_m} , $i=1,2,\dots,n-d$, $m=1,2,\dots,k$;

(4) 计算各方案对应的整体性指标 $I_{sum}(i)$ 和均衡性指标 $I_{bal}(i)$;

(5) 计算各方案对应的标准化整体性指标 $\hat{I}_{sum}(i)$ 和标准化均衡性指标 $\hat{I}_{bal}(i)$;

(6) 利用公式 $I(i) = 0.5\hat{I}_{sum}(i) + 0.5\hat{I}_{bal}(i)$ 形成各方案的优选指标,式中 $I(i)$ 表示方案 i 的优选指标;

(7) 选择布点优选指标最大的方案作为最优的STATCOM布点方案;

其中,n、d、k都是自然数。

所述步骤(3)中计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比包括以下步骤:

(1) 按照该布点方案接入容量为 Q_s 的STATCOM;

(2) 计算k条直流线路两两之间的多馈入交互因子 $MIIF_{jm} = \frac{Z_{mj}}{Z_{mm}}$, $j=1, 2, \dots, k$, $m=1, 2, \dots, k$,其中 Z_{mj} 为第m回直流所接节点与第j回直流所接节点的互阻抗, Z_{mm} 为第m回直流所接节点的自阻抗;

(3) 利用公式 $I_{MESCR_m} = \frac{S_{acm} + \sum_{l=1}^n \frac{Z_{ml}}{Z_{mm}} (Q_{sli} - Q_{cl})}{P_{dm} + \sum_{j=1, j \neq m}^k MIIF_{jm} \cdot P_{dj}}$, 计算第i个布点方案下系统第m回

直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比 I_{MESCR_m} , 其中, $i=1, 2, \dots, n-d$, $j=1, 2, \dots, k$, $m=1, 2, \dots, k$, $l=1, 2, \dots, n$, S_{acm} 表示第m回直流所接交流母线的短路容量, Z_{ml} 为第m回直流所接节点与节点l的互阻抗, Z_{mm} 为第m回直流所接节点的自阻抗, Q_{cl} 为节点l上并联的电容器容量, Q_{sli} 为第i个布点方案下,节点l上连接的STATCOM容量, P_{dm} 为第m回直流的额定功率, P_{dj} 为第j回直流的额定功率。

所述步骤(4)中计算各方案对应的整体性指标和均衡性指标包括以下步骤:

(1) 利用公式 $I_{sum}(i) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{MESCR_m}$ 计算每一个布点方案的整体性指标 $I_{sum}(i)$, 其中 $i=1, 2, \dots, n-d$ 对应STATCOM不同布点的方案; k 为系统中的直流回数, I_{MESCR_m} 为第i个STATCOM布点方案下第m回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比;

$$(2) \text{ 利用公式 } \bar{I}_{IMESCR}(i) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{IMESCR_m} \text{ 和公式 } I_{bal}(i) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{m=1}^k (I_{IMESCR_m} - \bar{I}_{IMESCR}(i))^2} \text{ 计}$$

算每一个布点方案的均衡性指标 $I_{bal}(i)$ 。

所述步骤 (5) 中计算各方案对应的标准化整体性指标和标准化均衡性指标包括以下步骤:

$$(1) \text{ 利用公式 } \hat{I}_{sum}(i) = \frac{I_{sum}(i) - \min I_{sum}}{\max I_{sum} - \min I_{sum}}, \quad i=1,2,\dots,n-d, \text{ 形成第 } i \text{ 个 STATCOM 布}$$

点方案的标准化整体性指标, 其中, $\max I_{sum}$ 表示所有布点方案中最大的整体性指标, $\min I_{sum}$ 表示所有布点方案中最小的整体性指标;

$$(2) \text{ 利用公式 } \hat{I}_{bal}(i) = \frac{\max I_{bal} - I_{bal}(i)}{\max I_{bal} - \min I_{bal}} \quad (i=1,2,\dots,n-d) \text{ 形成第 } i \text{ 个 STATCOM 布}$$

点方案的标准化均衡性指标, 其中, $\max I_{bal}$ 表示所有布点方案中最大的均衡性指标, $\min I_{bal}$ 表示所有布点方案中最小的均衡性指标。

[0014] 通过标准化处理, 整体性指标与均衡性指标均同向单调, 即经过标准化后的指标数值越大, 则方案越好; 且上述指标数值在 $[0, 1]$ 区间内, 数量级一致, 均无量纲, 便于步骤 (6) 的优选。

[0015] 本发明包括以下优点和技术效果:

新颖性: 与传统交流系统中 STATCOM 的布点方法不同, 本发明提供的 STATCOM 布点选择方法适用于目前正在快速发展的多馈入交直流混联系统。

[0016] 操作简单: 只需进行简单计算即可确定 STATCOM 的布点, 不需进行繁琐的仿真。

[0017] 准确性高: 提供了能够全面考虑 STATCOM 的布点位置及容量对电压稳定性影响的计入 STATCOM 影响的改进多馈入有效短路比。并基于此提出了不同 STATCOM 布点方案的整体性指标和均衡性指标, 使布点选择结果完整、准确地考虑了无功补偿设备对多馈入交直流系统的电压稳定性整体及局部的影响, 避免了电网规划人员通过经验选择 STATCOM 布点位置。

附图说明

[0018] 图1是一种多馈入交直流系统的 STATCOM 布点选择方法的流程图。

[0019] 图2为含三条直流馈线的10机39节点交直流混联电网结构示意图。

[0020] 图3为标识出12个优选指标最大的 STATCOM 接入节点的含三条直流馈线的10机39节点交直流混联电网示意图。

具体实施方式

[0021] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对本发明进行进一步详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明, 并不用于限定本发明。

[0022] 本发明提供一种多馈入交直流系统的 STATCOM 布点选择方法流程如图1所示, 包括以下步骤:

(1) 在有 n 个节点,其中发电机节点 d 个,直流落点 k 个的多馈入交直流混联电网中,确定装设STATCOM的容量为 Q_s 。

[0023] 欲装设的STATCOM容量 Q_s 由电网规划人员根据交直流混联系统电压稳定性的好坏决定。由于单台STATCOM成本较贵,为在STATCOM提供同等无功容量支撑的前提下减少设备购买费用,本发明仅设置一个STATCOM布点。

[0024] (2) 确定可接入STATCOM的节点集合为除发电机节点以外的其余 $n-d$ 个节点,即形成 $n-d$ 个布点方案。

[0025] 通常在发电机节点上不安装STATCOM,因此STATCOM可能的装设地点为系统中除发电机节点以外的其余所有节点。由于本发明只考虑单个STATCOM的装设,因此STATCOM的布点集合为{节点 p 上装设容量为 Q_s 的STATCOM(节点 p 为非发电机节点)}。

[0026] (3) 计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比 I_{MESCR_m} ($i=1,2,\dots,n-d, m=1,2,\dots,k$)。

[0027] (4) 计算各方案对应的整体性指标 $I_{sum}(i)$ ($i=1,2,\dots,n-d$)和均衡性指标 $I_{bal}(i)$ ($i=1,2,\dots,n-d$)。

[0028] (5) 计算各方案对应的标准化整体性指标 $\hat{I}_{sum}(i)$ ($i=1,2,\dots,n-d$)和标准化均衡性指标 $\hat{I}_{bal}(i)$ ($i=1,2,\dots,n-d$)。

[0029] (6) 利用公式 $I(i) = 0.5\hat{I}_{sum}(i) + 0.5\hat{I}_{bal}(i)$ ($i=1,2,\dots,n-d$)形成各方案的优选指标,式中 $I(i)$ 表示方案 i 的优选指标。

[0030] (7) 选择布点优选指标最大的方案作为最优的STATCOM布点方案。

[0031] 步骤(3)中计算各方案下系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比的步骤为:

[0032] (31) 按照该布点方案接入容量为 Q_s 的STATCOM。

[0033] (32) 计算 k 条直流线路两两之间的多馈入交互因子 $MIIF_{jm} = \frac{Z_{mj}}{Z_{mm}}$ ($j=1, 2,\dots,k, m=1,2,\dots,k$),其中 Z_{mj} 为第 m 回直流所接节点与第 j 回直流所接节点的互阻抗, Z_{mm} 为第 m 回直流所接节点的自阻抗。

[0034] 需要说明的是,该多馈入交互因子的推导过程如下:

[0035] 直流线路两两之间的多馈入交互因子 $MIIF_{jm}$ 的物理意义为在换流母线 m 上人为设置1%的电压跌落,由此导致换流母线 j 的电压跌落值,其公式表示如下:

$$[0036] \quad MIIF_{jm} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_m} \quad (1)$$

[0037] 式中, ΔU_j 和 ΔU_m 分别换流母线 j 和 m 的电压变化量。

[0038] 对于节点电压小扰动,系统节点电压方程为:

$$[0039] \quad \Delta \dot{U}_{ac} = Z_{BUS} \cdot \Delta \dot{I}_{ac} \quad (2)$$

[0040] 其中 Z_{BUS} 为系统节点阻抗矩阵, $\Delta \dot{I}_{ac}$ 为电流小扰动, $\Delta \dot{U}_{ac}$ 为电压小扰动。

[0041] 设引起换流母线m处电压变化的注入电流变化量为 $\Delta \dot{I}_m$ ，而其他位置注入电流保持不变，则换流母线m和换流母线j的电压变化量为：

$$[0042] \quad \Delta \dot{U}_m = 0 + \dots + Z_{mm} \Delta \dot{I}_m + \dots + 0 \quad (3)$$

$$[0043] \quad \Delta \dot{U}_j = 0 + \dots + Z_{jm} \Delta \dot{I}_m + \dots + 0 \quad (4)$$

[0044] 母线电压变化量的比值为

$$[0045] \quad \frac{\Delta \dot{U}_j}{\Delta \dot{U}_m} = \frac{Z_{jm} \Delta \dot{I}_m}{Z_{mm} \Delta \dot{I}_m} = \frac{Z_{jm}}{Z_{mm}} = \frac{Z_{mj}}{Z_{mm}} \quad (5)$$

则有：

$$MIIF_{jm} = \frac{\Delta U_j \%}{1\% \text{ voltage drop in } U_m} = \frac{Z_{mj}}{Z_{mm}} \quad (6)$$

$$(33) \text{ 其中利用公式 } I_{IMESCR_{im}} = \frac{S_{acm} + \sum_{l=1}^n \frac{Z_{ml}}{Z_{mm}} (Q_{Sli} - Q_{cl})}{P_{dm} + \sum_{j=1, j \neq m}^k MIIF_{jm} \cdot P_{dj}} \quad (i=1, 2, \dots, n-d, j=1,$$

$2, \dots, k, m=1, 2, \dots, k, l=1, 2, \dots, n)$ 计算第*i*个布点方案下系统第*m*回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比 $I_{IMESCR_{im}}$ ，其中 S_{acm} 表示第*m*回直流所接交流母线的短路容量， Z_{ml} 为第*m*回直流所接节点与节点*l*的互阻抗， Z_{mm} 为第*m*回直流所接节点的自阻抗， Q_{cl} 为节点*l*上并联的电容容量， Q_{Sli} 为第*i*个布点方案下，节点*l*上连接的STATCOM容量， P_{dm} 为第*m*回直流的额定功率， $MIIF_{jm}$ 为第*m*回直流与第*j*回直流的交互因子， P_{dj} 为第*j*回直流的额定功率。

值得说明的是， $I_{IMESCR_{im}}$ 是从传统多馈入有效短路比 I_{MESCR_m} 的基础上改进而来的。传统多馈入有效短路比的计算公式为：

$$I_{MESCR_m} = \frac{S_{acm} - Q_{cm}}{P_{dm} + \sum_{j=1, j \neq m}^k MIIF_{jm} \cdot P_{dj}} \quad (7)$$

式中： S_{acm} 为换流站*m*处的短路容量， Q_{cm} 是换流站*m*交流母线电压取额定值时换流站内滤波器和并联电容器提供的无功功率， P_{dm} 、 P_{dj} 为直流系统*m*和*j*的额定输送容量， k 为多馈入系统中所馈入的直流线路总数。

本发明为得出更加贴合实际的结论，全面考虑了系统中装设的STATCOM与分散电容的影响，基于无功补偿设备装设位置与直流落点的电气距离，对传统多馈入有效短路比进行了改进，进而得出计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比计算公式为：

$$I_{IMESCR_{im}} = \frac{S_{acm} + \sum_{l=1}^n \frac{Z_{ml}}{Z_{mm}} (Q_{Sli} - Q_{cl})}{P_{dm} + \sum_{j=1, j \neq m}^k MIIF_{jm} \cdot P_{dj}} \quad (8)$$

式中, $\frac{Z_{ml}}{Z_{mm}}$ 表示系统中任意节点的并联电容器或STATCOM补偿容量折算到直流落点处的无功补偿量的折算因子。

另外, 由于每个布点方案仅在一个节点装设STATCOM, 因此

$$Q_{sl} = \begin{cases} 0 & (\text{节点 } l \text{ 为第 } i \text{ 个方案装设 STATCOM 的节点}) \\ Q_s & (\text{节点 } l \text{ 不是第 } i \text{ 个方案装设 STATCOM 的节点}) \end{cases} \quad (9)$$

计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比指标与常规多馈入短路比指标相比, 增加了对STATCOM容量及装设地点与直流落点之间的电气距离, 系统中并联电容器容量及装设地点与直流落点之间的电气距离两个因素的考虑, 使该指标更加全面、准确地反映无功补偿设备对多馈入交直流系统电压稳定性的影响, 为STATCOM的布点优化提供了理论依据。

步骤(4)中计算各方案对应的整体性指标和均衡性指标的步骤为:

(41) 利用公式 $I_{sum}(i) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{IMESCR_{im}}$ 计算每一个布点方案的整体性指标 $I_{sum}(i)$, 其中 $i=1, 2, \dots, n-d$ 对应STATCOM不同布点的方案。 k 为系统中的直流回数, $I_{IMESCR_{im}}$ 为第 i 个STATCOM布点方案下第 m 回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比。

布点方案的整体性指标可以反映STATCOM投入对交直流系统稳定性的总体效应, 各布点方案中, $I_{sum}(i)$ 越大, 说明方案越具有优越性。

$$(42) \text{ 利用公式 } \bar{I}_{IMESCR}(i) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k I_{IMESCR_{im}} \text{ 和公式 } I_{bal}(i) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{m=1}^k (I_{IMESCR_{im}} - \bar{I}_{IMESCR}(i))^2}$$

计算每一个布点方案的均衡性指标 $I_{bal}(i)$ 。其中 $i=1, 2, \dots, n-d$, 对应STATCOM不同布点的方案。 k 为系统中的直流回数, $I_{IMESCR_{im}}$ 为第 i 个STATCOM布点方案下第 m 回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比。

多馈入有效短路比指标值低的直流系统, 往往是系统中的薄弱点。因此在进行STATCOM的布点方案选择时, 需要优先考虑增强较弱的直流系统, 使得系统中的所有直流稳定性均在合理水平上, 避免因个别直流短路比指标值低、支撑能力弱的木桶效应的情况出现, 即体现出均衡性原则。均衡性指标很好地体现了这一原则, $I_{bal}(i)$ 越小说明均衡性越好。

步骤(5)中计算各方案对应的标准化整体性指标和标准化均衡性指标的步骤为:

$$(51) \text{ 利用公式 } \hat{I}_{sum}(i) = \frac{I_{sum}(i) - \min I_{sum}}{\max I_{sum} - \min I_{sum}} \quad (i=1, 2, \dots, n-d)$$
 形成第 i 个STATCOM

布点方案的标准化整体性指标。其中 $I_{sum}(i)$ 表示第 i 个STATCOM布点方案的整体性指标, $\max I_{sum}$ 表示所有布点方案中最大的整体性指标, $\min I_{sum}$ 表示所有布点方案中最小的整体性指标。

$$(52) \text{ 利用公式 } \hat{I}_{bal}(i) = \frac{\max I_{bal} - I_{bal}(i)}{\max I_{bal} - \min I_{bal}} \quad (i=1, 2, \dots, n-d)$$
 形成第 i 个STATCOM布

点方案的标准化均衡性指标。其中 $I_{bal}(i)$ 表示第 i 个STATCOM布点方案的均衡指标, $\max I_{bal}$ 表示所有布点方案中最大的均衡性指标, $\min I_{bal}$ 表示所有布点方案中最小的均衡性指标。

对于整体性指标与均衡性指标,整体性指标 I_{sum} 越大越优,均衡性指标 I_{ba1} 越小越优。因此,对于这2个从不同角度考虑的指标,其单调方向不同,需要在指标标准化处理中解决这个问题。通过采用步骤(5)中的标准化方法,整体性指标与均衡性指标均同向单调,即经过标准化后的指标数值越大,则方案越好;且上述指标数值在 $[0, 1]$ 区间内,数量级一致,均无量纲,便于步骤(6)的优选。

[0046] 实例

在新英格兰10机39节点系统的基础上,将3个发电机替换为经换流站接入直流系统,形成3回直流馈入的交直流混联系统,其拓扑结构如图2所示,节点1~节点39用Bus-1~Bus-39来表示。其中,3回直流的额定功率如表1所示。

[0047] 表1 所接入的三回直流的额定功率

直流系统	换流母线节点	输送功率/MW
直流系统 1	Bus-33	650
直流系统 2	Bus-35	670
直流系统 3	Bus-36	560

现有一容量为300MVar的STATCOM,欲将该STATCOM接入图2所示系统,以在最大程度上提高系统的电压稳定性。在该实施例中,采用中国电力科学研究院开发的PSD电力系统分析软件包进行计算。

[0048] 实施例提供的多馈入交直流系统的STATCOM布点选择方法步骤具体如下:

(1) 确定接入的STATCOM容量为给定的300MVar。

[0049] (2) 确定可接入STATCOM的节点集合,系统中除发电机以外其他32个节点均可作为STATCOM接入点,即STATCOM的布点集合为{Bus- p 上装设容量为300MVar的STATCOM} ($p=1, 2, \dots, 29, 33, 35, 36$),共32个布点方案。

[0050] (3) 分别对应步骤(2)中的32个布点方案,计算STATCOM接入后,系统中各回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比值。

[0051] (4) 计算以上32个布点方案的整体性指标值和均衡性指标值。

[0052] (5) 对以上32个布点方案的整体性指标和均衡性指标进行标准化。

[0053] (6) 对以上32个方案的标准化指标进行整合计算,得到各方案的布点优选指标值。

[0054] 表2和表3给出了布点优选指标值较大的12个方案的计算结果。将布点优选指标值较大的12个布点标识出来,如图3所示。从图3中可以看出优选指标值较大的方案中,STATCOM的布点位置均靠近直流换流站落点。这是由于STATCOM的位置越接近直流落点,其对直流系统支撑能力越高,对计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比的提升效果越高。

[0055] 表2布点优选值最大的12个布点方案的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比计算值

编号	接入点	直流系统 1		直流系统 2		直流系统 3	
		直流多点到 补偿点折算 因子	计算值	直流多点到 补偿点折算 因子	计算值	直流多点到 补偿点折算 因子	计算值
1	36	0.321	2.679	0.456	2.450	1	2.649
2	35	0.217	2.647	1	2.512	0.456	2.497
3	22	0.253	2.658	0.596	2.478	0.501	2.510
4	23	0.39	2.700	0.55	2.465	0.68	2.560
5	21	0.29	2.669	0.514	2.455	0.461	2.499
6	24	0.355	2.689	0.42	2.406	0.487	2.506
7	16	0.376	2.696	0.311	2.397	0.384	2.477
8	17	0.308	2.675	0.232	2.375	0.294	2.452
9	15	0.296	2.671	0.227	2.374	0.265	2.444
10	20	0.535	2.745	0.244	2.379	0.268	2.445
11	19	0.713	2.799	0.239	2.377	0.268	2.445
12	33	1	2.888	0.217	2.371	0.321	2.460

表3布点优选指标值最大的12个布点方案的整体性指标、均衡性指标及布点优选指标计算值

编号	接入点	整体性指标	均衡性指标	布点优选指标
1	36	1.000	0.942	0.971
2	35	0.873	1.000	0.937
3	22	0.744	0.929	0.837
4	23	0.831	0.814	0.823
5	21	0.700	0.840	0.770
6	24	0.659	0.684	0.672
7	16	0.599	0.629	0.614
8	17	0.467	0.623	0.545
9	15	0.442	0.624	0.533
10	20	0.595	0.419	0.507
11	19	0.698	0.255	0.477
12	33	0.885	0.000	0.442

(7) 选择布点优选指标最大的方案,即在Bus-36上接入300MVar的STATCOM,作为最优的STATCOM布点方案。

[0056] 下面对布点结果进行简单分析:

Bus-36节点处的布点优选指标值最高。整体性指标方面, Bus-36处指标值为1,表明在Bus-36处接入300Mvar的STATCOM对三回直流的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比指标提升的总量最大。具体分析, Bus-36是直流系统3的换流母线,在此处接入STATCOM对换流系统3的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比指标提升量最大,此外Bus-36到其他两个换流母线的折算因子值均高于0.3,即Bus-36到其他两个换流母线的距离也较近,使得Bus-36接入STATCOM对换流系统1和2的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比指标提升量也较大。故而在Bus-36处接入STATCOM对系统整体性的提升量最大。均衡性指标方面, Bus-36处接入STATCOM较大的提升了直流系统3和直流系统2的计入STATCOM影响的改进多馈入有效短路比计算值,一定程度上减小了三者短路比指标值上的差异,因而Bus-36处的均衡性指标值也较高。



图1

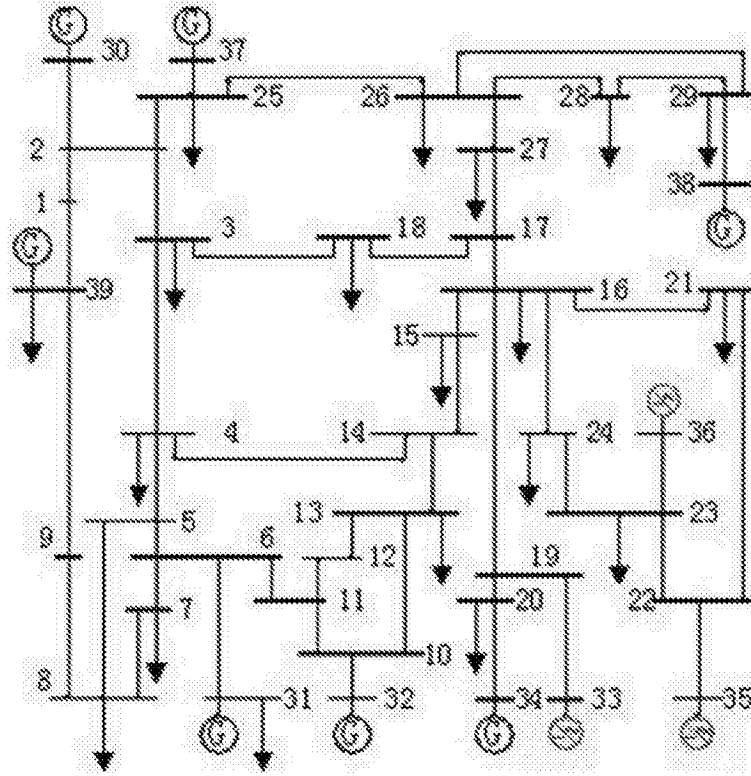


图2

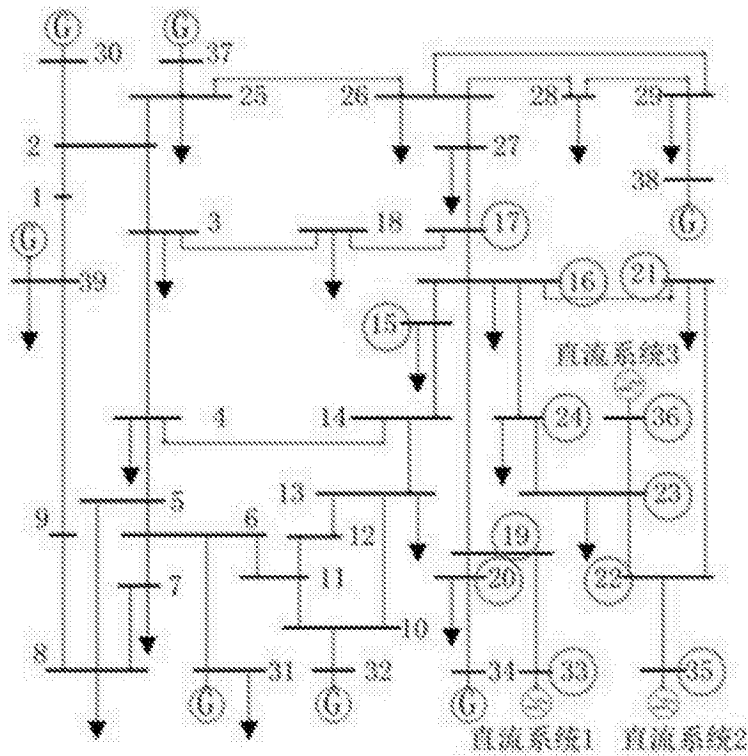


图3