

DOI: 10.7667/PSPC170972

功率调节与 STATCOM 输出电压关系的灵敏度分析

马小然, 吴新振, 王海峰

(青岛大学自动化与电气工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 为定量分析静止无功补偿器(STATCOM)传递功率与其交流侧输出电压之间的关系, 采用了基于灵敏度的分析方法。以基尔霍夫电压定律为基础, 列写了 STATCOM 系统的电压相量方程, 并根据实部与虚部得到两个独立等式。通过计算 STATCOM 交流侧输出电压有效值与相角对有功功率和无功功率的偏导数, 求出了相应的灵敏度。灵敏度计算结果表明, 当系统侧电压、线路参数均不变时, STATCOM 交流侧输出电压有效值和相角均主要受无功功率的影响, 受有功功率影响较小。同时用直接求取法计算 STATCOM 交流侧输出电压, 通过与灵敏度法的计算结果进行数值比较, 验证灵敏度分析方法的准确性。

关键词: STATCOM; 有功功率; 无功功率; 灵敏度; 电压变化

Sensitivity analysis of relation between power control and output voltage of STATCOM

MA Xiaoran, WU Xinzen, WANG Haifeng

(College of Automation and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: To quantitatively study relationship between the transferred power and the AC output voltage of STATCOM, the method based on the sensitivity analysis is utilized. The voltage phasor equation of STATCOM is established based on the KVL, and two independent equations are acquired according to the real component and the imaginary component, respectively. By calculating partial derivatives of the RMS value and the phase angle of STATCOM AC output voltage to the active power and the reactive power, corresponding sensitivity results are obtained. It shows that the influence of the reactive power on the RMS value and the phase angle of AC output voltage is much greater than that of the active power. Moreover, the AC output voltages of STATCOM calculated by the direct method are compared with those by the sensitivity method, verifying the correctness and accuracy of the presented sensitivity method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677092).

Key words: STATCOM; active power; reactive power; sensitivity analysis; voltage variation

0 引言

随着电力系统中大容量异步电动机等感性负荷的增多, 电能质量受到了严重的影响, 而技术的日益发展促使新电力设备的研发并投入使用, 人们对于供电质量的要求越来越高, 因此合理选择无功补偿器投入电网使用来优化电能质量变得日益重要。静止无功补偿器(STATCOM)是新型无功补偿设备, 相比之前的同步调相机、静电电容器、静止补偿器(SVC)等设备, STATCOM 调节速度更快、运行范围更宽, 而且大大减小了系统中所用电抗器的容量,

提高了系统电压的稳定性, 改善了系统的动态性能, 具有很好的鲁棒性^[1-4], 因此从各电子补偿设备中脱颖而出, 成为无功补偿装置的主流。针对非线性负载、电网的不平衡运行、短路故障等原因导致的线路非线性, 研究发现, 根据 STATCOM 的控制原理, 其对系统具有稳定电压的功能^[5-10]。STATCOM 的装置设计是在假定电网三相平衡的情况下完成的, 而实际上电网无法保证完全的平衡, 电网系统不平衡时会直接影响 STATCOM 的正常运行^[11-12]。因此针对日益复杂的电力系统, 国内外专家对 STATCOM 的控制策略有了更加充分的研究^[13-15], 取得了一系列成果。目前, 电力系统中各种非线性及时变性电子装置(如逆变器、整流器及各种开关电

源等)的使用会向电网中注入大量的谐波和次谐波分量,导致交流电网中电压和电流波形的严重失真。而现阶段针对谐波抑制的方法分为无源(LC 滤波器)和有源滤波两种,其中有源滤波的原理即滤波器部分抵消了负载电流中的谐波分量,根据 KCL 定律可知,系统侧余下了基波电流分量,从而提高了供电质量^[16-17]。文献[18]为分析电力电子装置不同位置上寄生电容的对共模传导干扰影响大小,采用了灵敏度的分析方法,有助于解决电力电子装置传导干扰分析中传播途径确定较难的问题。

本文在 STATCOM 的诸多研究成果基础上,为定量分析电网与 STATCOM 间传递的功率与其交流侧输出电压之间的关系,引入了灵敏度的分析方法。分别计算 STATCOM 交流侧输出电压有效值与相角对有功功率和无功功率的偏导数,求出了相应的灵敏度。再通过所得数值大小比较得出功率对输出电压影响的具体程度。另外通过直接求取的方法所得结果与之进行比较,验证灵敏度计算公式以及相关结论的正确性。本文为满足系统所需功率,定量设计 STATCOM 控制策略以控制其交流侧输出电压提供了依据。

1 STATCOM 结构及相量关系

STATCOM 作为静止无功补偿设备,采用自换相交流电路,其主电路分为电压型桥式电路和电流型桥式电路。本文以采用自换相电压型桥式电路的 STATCOM 为主要研究对象,结构如图 1 所示。

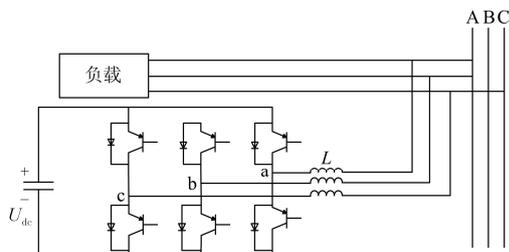


图 1 STATCOM 结构

Fig. 1 Structure of STATCOM

由图 1 可知,由三对开关元器件 IGBT 及续流二极管组成 STATCOM 的逆变部分,直流侧连接直流电容,对应有直流电压 U_{dc} ,输出交流侧通过连接电抗器与电网相连。根据其逆变部分的原理,当仅考虑基波频率时,STATCOM 可视为一个幅值与相位可控的交流电压源。考虑到连接电抗器的损耗和变流器本身的损耗(如管压降、线路电阻等),可将总的损耗集中作为连接电抗器的电阻考虑,连接电抗器等效电阻 R 与连接电抗器电抗 X 统称为线路

参数。当仅考虑基波时,STATCOM 系统三相平衡时其单相等效电路图工作原理如图 2 所示。

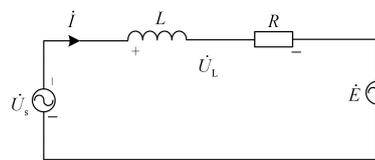


图 2 STATCOM 系统单相等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of STATCOM system

图中,系统侧电压相量有效值为 U_s ,STATCOM 交流侧输出电压相量有效值为 E ,两者相量差有效值为 U_L 。

由 KVL 得

$$\dot{I}(R + jX) + \dot{E} = \dot{U}_s \quad (1)$$

理想状况下,STATCOM 变流器部分无需消耗有功功率,因此交流侧输出电压与电流相差 90° ,因此电网电压与 STATCOM 交流侧输出电压相位相同。但是由于连接电阻的存在,会消耗一部分有功功率,这部分功率由系统侧提供,因此电网电压与电流不再呈 90° ,而是略小于 90° ,使得电网电压与 STATCOM 交流侧输出电压存在相位差 δ 。由于变流器本身的损耗归算至交流侧作为连接电抗器等效电阻的一部分,而实际上这部分损耗发生在变流器内部,因此交流侧输出电压与电流的相位差会略小于 90° 。当 E 大于 U_s 时,电流超前于系统电压,此时 STATCOM 向电网发出无功功率,相量关系图如图 3 所示;当 E 小于 U_s 时,电流滞后于系统电压,STATCOM 从电网吸收无功功率。无论 STATCOM 向电网发出无功功率,还是从电网吸收无功功率,分析过程基本相同,下文仅就 STATCOM 向电网发出无功功率并从电网吸收有功功率这种功率传递情况,即针对电流超前的情况进行分析。

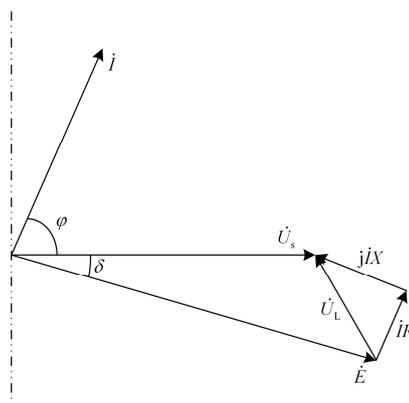


图 3 STATCOM 系统的相量关系(电流超前)

Fig. 3 Phasor relation of STATCOM system (current led)

在电网电压保持不变时, 调节 STATCOM 交流侧输出电压的幅值与相位, 可改变连接电抗上的电压, 从而改变电流的幅值和相位, 以达到 STATCOM 装置从电网吸收或发出无功功率的目的。

2 STATCOM 输出电压对功率的灵敏度

由于在实际运行中, STATCOM 交流侧输出电压可以通过装置逆变部分的开关器件, 以及其控制策略进行控制, 方便可调。当系统侧电压以及线路参数均不变时, 通过对交流侧输出电压的调节实现对线路电流的控制, 即实现对电网与装置之间的有功和无功功率的控制。因此本文通过研究交流侧输出电压对功率的灵敏度, 当系统对功率有所要求时, 可通过灵敏度公式反推得出交流侧输出电压有效值和相角的相对变化率, 通过装置策略的控制和调节, 实现系统的需求。

针对式(1)中的各相量, 用两种方式表示。其中系统电压和交流侧输出电压分别用有效值和相角表示, 对应的相量实部由有效值与相角余弦之积得到, 虚部由有效值与相角正弦之积得到。而流经线路电流用有功部分和无功部分表示, 对应的实部为有功电流, 虚部为无功电流。若假定系统侧 a 相电压相角为参考相位 0° , 则各相量可以表示为

$$\dot{U}_s = U_s \quad (2)$$

$$\dot{I} = I \cos \varphi + jI \sin \varphi = I_r + jI_i \quad (3)$$

$$\dot{E} = E \angle \delta \quad (4)$$

式中: I_r 、 I_i 分别表示有功电流和无功电流; δ 表示输出电压相角。交流侧输出电压和线路电流超前系统电压时相角取正值, 否则取负值。

将式(2)一式(4)代入式(1), 得到其实部、虚部分别为

$$\begin{cases} E \cos \delta = U_s - RI_r + XI_i \\ E \sin \delta = -RI_i - XI_r \end{cases} \quad (5)$$

化简得到

$$E^2 = (U_s - RI_r + XI_i)^2 + (RI_i + XI_r)^2 \quad (6)$$

$$\tan \delta = \frac{-RI_i - XI_r}{U_s - RI_r + XI_i} \quad (7)$$

因此当系统侧电压 U_s 、连接参数 R 、 X 均不变时, STATCOM 交流侧输出电压的有效值 E 和相角 δ 会影响流经 STATCOM 系统与电网之间的线路电流, 该电流的实部与虚部分别对应系统的有功功率和无功功率。交流侧输出电压变化与功率调节程度之间的定量关系可用灵敏度来表示, 因此下文用偏导数计算 E 、 δ 对有功功率、无功功率的灵敏度。

2.1 输出电压对有功功率的灵敏度

由电路原理可得电网与 STATCOM 之间的有功功率为

$$P = U_s I_r \quad (8)$$

由于系统侧电压恒定, 因此输出电压对有功功率的相对灵敏度与输出电压对有功电流的相对灵敏度线性相关。

输出电压有效值 E 对有功功率 P 的灵敏度为

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \frac{\partial E}{U_s \partial I_r} \quad (9)$$

根据式(6)得到

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \frac{-U_s R + I_r (R^2 + X^2)}{U_s E} \quad (10)$$

若 P 与 E 用相对变化量表示, 对应的相对灵敏度 R_{EP} 为

$$R_{EP} = \frac{P}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial P} = \frac{-U_s I_r R + I_r^2 (R^2 + X^2)}{E^2} \quad (11)$$

输出电压相角 δ 对有功功率 P 的灵敏度为

$$\frac{\partial \delta}{\partial P} = \frac{\partial \delta}{U_s \partial I_r} \quad (12)$$

根据式(7)得到

$$\frac{\partial \delta}{\partial P} = -\frac{[U_s X + I_i (R^2 + X^2)] \cos^2 \delta}{U_s (U_s - RI_r + XI_i)^2} \quad (13)$$

若 P 用相对变化量表示, δ 用实际变化量弧度 (rad) 表示, 对应的灵敏度 $R_{\delta P}$ 为

$$R_{\delta P} = P \cdot \frac{\partial \delta}{\partial P} = -\frac{[U_s X + I_i (R^2 + X^2)] \cdot I_r \cos^2 \delta}{(U_s - RI_r + XI_i)^2} \quad (14)$$

2.2 输出电压对无功功率的灵敏度

电网与 STATCOM 之间的无功功率为

$$Q = U_s I_i \quad (15)$$

同理, 输出电压对无功功率的相对灵敏度与输出电压对无功电流的相对灵敏度线性相关。

输出电压有效值 E 对无功功率 Q 的灵敏度为

$$\frac{\partial E}{\partial Q} = \frac{\partial E}{U_s \partial I_i} \quad (16)$$

根据式(6)得到

$$\frac{\partial E}{\partial Q} = \frac{U_s X + I_i (R^2 + X^2)}{U_s E} \quad (17)$$

若 Q 与 E 用相对变化量表示, 对应的相对灵敏度 R_{EQ} 为

$$R_{EQ} = \frac{Q}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial Q} = \frac{U_s I_i X + I_i^2 (R^2 + X^2)}{E} \quad (18)$$

输出电压相角 δ 对无功功率 Q 的灵敏度为

$$\frac{\partial \delta}{\partial Q} = \frac{\partial \delta}{U_s \partial I_r} \quad (19)$$

根据式(7)得到

$$\frac{\partial \delta}{\partial Q} = -\frac{[U_s R - I_r (R^2 + X^2)] \cdot \cos^2 \delta}{U_s (U_s - R I_r + X I_i)^2} \quad (20)$$

若 Q 用相对变化量表示, δ 用实际变化量弧度表示, 对应的灵敏度 $R_{\delta Q}$ 为

$$R_{\delta Q} = Q \cdot \frac{\partial \delta}{\partial Q} = -\frac{[U_s R - I_r (R^2 + X^2)] I_i \cos^2 \delta}{(U_s - R I_r + X I_i)^2} \quad (21)$$

因此, 在调节有功功率 P 和无功功率 Q 时, 就要求 E 和 δ 做相应的变化。假定 P 的相对调节量为 ΔP , Q 的相对调节量为 ΔQ , 则根据式(11)和式(18)可写出 E 对功率的相对变化量 ΔE_{PQ} 为

$$\Delta E_{PQ} = R_{EP} \Delta P + R_{EQ} \Delta Q \quad (22)$$

同样, 根据式(14)和式(21)可写出相角 δ 对功率的弧度变化量 $\Delta \delta_{PQ}$ 为

$$\Delta \delta_{PQ} = R_{E\delta} \Delta P + R_{\delta\delta} \Delta Q \quad (23)$$

3 灵敏度计算结果分析

根据图 1 所示的系统结构图, 本文选取的变量与参数为: $R=0.05 \Omega$, $L=1 \text{ mH}$, $U_{dc}^*=600 \text{ V}$, $U_s=220 \text{ V}$, $f=50 \text{ Hz}$ 。以 STATCOM 系统 a 相为例, 系统侧电压相量、STATCOM 输出电压相量、STATCOM 电流相量分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_s = 220 \angle 0^\circ \text{ V} \\ \dot{E} = 240.76 \angle -1^\circ \text{ V} \\ \dot{I} = 66.990 \angle 87.7^\circ \text{ A} = (2.6876 + j66.937) \text{ A} \end{cases}$$

因此得到有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P = 0.5913 \text{ kW} \\ Q = 14.73 \text{ kvar} \end{cases}$$

为分析有功功率 P 和无功功率 Q 的变化对 E 与 δ 大小的影响, 依次改变 P 和 Q 其中一个参数值得到的对应基频下的灵敏度, 那么有功电流和无功电流对交流侧输出电压具体的影响程度用灵敏度计算的结果如表 1。

表 1 电流超前时的灵敏度计算结果

灵敏度	数值
R_{EP}	-4.9741×10^{-4}
$R_{\delta P} / \text{rad}$	-3.5133×10^{-3}
R_{EQ}	8.7633×10^{-2}
$R_{\delta Q} / \text{rad}$	-1.2370×10^{-2}

由表 1 可得, 在电流超前的情况下, 当系统侧电压 U_s 、线路参数 R 、 X 均不变时, STATCOM 交流侧输出电压的有效值和相角对 STATCOM 与电网之间传递的功率的灵敏度不同, 即影响程度不同。其中输出电压有效值 E 受无功功率 Q 的影响较大, 受有功功率 P 的影响较小, 二者相差超过两个数量级; 输出电压相角 δ 受无功功率 Q 的影响较大, 受有功功率 P 的影响较小, 二者相差接近一个数量级。

由上面分析可知, 当系统侧电压、线路参数均不变时, STATCOM 交流侧输出电压的有效值和相角对有功功率和无功功率的灵敏度不同。经过灵敏度数值比较可知, 输出电压有效值和相角均主要受无功功率的影响。

4 灵敏度结果验证

为了验证以上灵敏度计算公式的正确性, 先根据式(1)、式(9)、式(16)所得的系统相量关系式及功率表达式直接求取其电网与 STATCOM 之间的有功功率和无功功率改变后, 对应 STATCOM 交流侧输出电压的有效值和相角, 所得结果为精确值。再通过灵敏度法计算当电网与 STATCOM 之间的有功功率和无功功率改变后, 对应 STATCOM 交流侧输出电压的有效值和相角, 即分别根据式(11)、式(14)和式(18)、式(21)得到。对灵敏度法计算得到的实际值与精确值进行数值比较, 验证灵敏度公式的准确性。

现验证交流侧输出电压有效值和相角对有功功率和无功功率的灵敏度。为使结果具有针对性, 前两次先依次只改变一个功率参量, 即分别只改变有功功率和无功功率, 最后有功和无功参量全变。表 2 和表 3 分别表示输出电压有效值 E 和相角 δ 对有功功率和无功功率的灵敏度。在计算过程中, P 和 Q 的相对变化量分别取 5% 和 20%。由式(9)、式(16)可知, 当系统侧电压保持不变时, P 、 Q 的相对变化率即 I_r 、 I_i 的相对变化率。

表 2 输出电压有效值对功率的灵敏度验证

Table 2 Sensitivity verification of RMS value of output voltage to power

$\Delta P / \Delta Q$	灵敏度法/V	直接法/V	相对误差
5%/0	240.75	240.74	4.15×10^{-5}
0/5%	241.81	241.80	4.14×10^{-5}
5%/5%	241.81	241.79	8.27×10^{-5}
20%/0	240.74	240.72	8.31×10^{-5}
0/20%	244.98	244.96	8.16×10^{-5}
20%/20%	244.96	244.94	8.17×10^{-5}

表 3 输出电压相角对功率的灵敏度验证
Table 3 Sensitivity verification of phase angle of
output voltage to power

$\Delta P/\Delta Q$	灵敏度法/rad	直接法/rad	绝对误差/rad
5%/0	-0.017 629	-0.017 628	-1×10^{-7}
0/5%	-0.018 071	-0.018 068	-3×10^{-7}
5%/5%	-0.018 247	-0.018 243	-1×10^{-7}
20%/0	-0.018 156	-0.018 155	-1×10^{-7}
0/20%	-0.019 927	-0.019 885	-4.2×10^{-6}
20%/20%	-0.020 630	-0.020 576	-5.4×10^{-6}

由表 2、表 3 可以看出, 由灵敏度法计算得到的实际值与直接求取法得到的精确值吻合很好, 数值相差甚微, 当相对变化率为 5% 时, 二者的相对误差绝对值小于 0.05%; 当相对变化率增至 20% 时, 二者的相对误差绝对值增加, 但依旧可以保持在 0.6% 以内, 属于合理范围。由此说明上述推导的灵敏度式(10)一式(24)正确无误。

从表 2 中发现, 当 P 或 Q 单独变化时, 相对变化率均从 5% 变为 20%, Q 单独变化对应的有效值变化更大, 说明交流侧输出电压有效值主要受无功功率影响。也可从表 3 中发现, 当 P 或 Q 单独变化时, 同样是相对变化率均从 5% 变为 20%, Q 单独变化对应的相角变化更大, 说明交流侧输出电压相角主要受无功功率影响。

综上所述, 当系统侧电压、连接线路参数均不变时, STATCOM 交流侧输出电压有效值、相角对电网和 STATCOM 之间传递功率的灵敏度不同, 输出电压有效值和相角受无功功率的影响要大得多, 这与前面灵敏度分析结果一致, 从而间接验证了灵敏度分析结果的正确性。

5 结论

本文为分析功率与 STATCOM 交流侧输出电压之间的关系, 通过定量计算 STATCOM 交流侧输出电压对有功和无功功率的灵敏度。结果表明, 当系统侧电压、参数均不变时, STATCOM 交流侧输出电压有效值和相角对 STATCOM 传递功率的灵敏度不同。输出电压有效值受无功功率的影响较大, 受有功功率的影响较小, 二者相差两个数量级; 输出电压相角受无功功率的影响较大, 受有功功率的影响较小, 二者相差一个数量级。

综合以上分析, 可以通过对 STATCOM 控制策略的合理设计, 有针对性地调节控制交流侧输出电压, 以满足对系统间功率传输的具体需求。

参考文献

- [1] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] MORATI M, GIROD D, TERRIEN F, et al. Industrial 100-MVA EAF voltage flicker mitigation using VSC-based STATCOM with improved performance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(6): 2494-2501.
- [3] 张茂松, 王群京, 李国丽, 等. 中点钳位式三电平 D-STATCOM 的鲁棒电流和中点电位控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3868-3877.
ZHANG Maosong, WANG Qunjing, LI Guoli, et al. Study on robust current and neutral-point potential control for the D-STATCOM based on NPC three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3868-3877.
- [4] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [5] 李辉, 马飞, 张浩, 等. 三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统在配电网中的应用及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 107-114.
LI Hui, MA Fei, ZHANG Hao, et al. Research on the application and simulation of three phase four wire D-STATCOM/HESS system in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 107-114.
- [6] ZHAO J Q, ZHANG Y J, ZHANG P, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI: 10.1186/s41601-016-0013-1.
- [7] 贾东强, 韦统振, 霍群海. DSTATCOM 交直流控制回路交互影响分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 324-330.
JIA Dongqiang, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. The interaction analysis between AC and DC control loop of DSTATCOM[J]. Transaction of China Electrotechnical

- Society, 2013, 28(S2): 324-330.
- [8] 张扬, 常亮, 杨小品. ± 100 Mvar 高压 STATCOM 直接电流分相谐振控制参数整定方法及 RTDS 仿真实验[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 27-32.
ZHANG Yang, CHANG Liang, YANG Xiaopin. Parameters setting on independent phase resonant control of STATCOM under higher voltage and RTDS simulation experiment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 27-32.
- [9] SUN Y Z, SUN C X, WANG Z F, et al. Voltage security enhancement using ASVG nonlinear control[C] // International Conference on Energy Management and Power Delivery, November 21-23, 1995, Singapore, Singapore: 337-341.
- [10] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.
LUO An, OU Jianbo, TANG Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60.
- [11] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 138-143.
RONG Fei, LUO An, FAN Qing. A novel voltage control method applied in statcom under unbalanced system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 138-143.
- [12] 常鲜戎, 殷绕方. 结合空间矢量法的 D-STATCOM 滞环电流控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 60-65.
CHANG Xianrong, YIN Raofang. A hysteresis current control method combined with SVPWM for D-STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 60-65.
- [13] ISOBE T, SHIOJIMA D, KATO K, et al. Full-bridge reactive power compensator with minimized-equipped capacitor and its application to static var compensator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1): 224-234.
- [14] 余翔. 基于级联多电平逆变器的 STATCOM 及其控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
YU Xiang. STATCOM based on cascaded multilevel inverter and its control strategy research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [15] WANG Y, CHAI Y, TANG J, et al. DC voltage control strategy of chain star STATCOM with second-order harmonic suppression[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(14): 2645-2653.
- [16] DAS J C. Application of STATCOM to an industrial distribution system connected to a weak utility system[C] // Pulp, Paper & Forest Industries Conference, June 19-23, 2016, Austin, USA: 124-135.
- [17] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [18] 单潮龙, 马伟明, 王铁军, 等. 灵敏度分析应用于软关断斩波器共模传导干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 167-171.
SHAN Chaolong, MA Weiming, WANG Tiejun, et al. The application of sensitivity analysis on the study of common-mode conducted interference of a soft-switched DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 167-171.

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-09-13

作者简介:

马小然(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为静止无功补偿器以及灵敏度计算; E-mail: maxr92@163.com

吴新振(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机系统分析与控制、电力系统分析与控制; E-mail: wuxinzen81@163.com

王海峰(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为自激异步发电系统控制。E-mail: whaifeng92@163.com

(编辑 姜新丽)