

基于SVD方法的多台配电网静止无功补偿器交互影响分析

王振浩¹, 姚艳菊¹, 陈继开²

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 黑龙江省电力科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 配电网静止无功补偿器(DSVC)是综合治理电能质量问题的有效装置,其多个装置间的交互影响问题应予以考虑。以含两台DSVC的简单配电系统为研究对象,建立了考虑感应电动机负荷的含两台DSVC的单负荷无穷大配电系统线性化模型,在此模型的基础上推导得出系统传递函数矩阵,并运用基于奇异值分解(SVD)的方法,定量分析了在不同电气参数下两台DSVC的交互影响问题。通过SVD计算,得到了交互影响随电气距离的缩短而增大的结论。通过时域仿真,验证了SVD计算所得的结论,表明了所建线性化模型及SVD方法的有效性。

关键词: 配电网; DFACTS; 静止无功补偿器; 奇异值分解; 交互影响

Interactions analysis of multiple DSVC controllers based on SVD method

WANG Zhen-hao¹, YAO Yan-ju¹, CHEN Ji-kai²

(1. Northeast Dianli University, Jinlin 132012, China; 2. Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: As distribution static var compensator (DSVC) can synthetically manage power quality problems, the interactions among the DSVC controllers should be considered. The paper establishes the linearized model of a single-load infinite-bus distribution system installed with two DSVC considering the induction motor load, and the system transfer function array can be obtained based on this model. Then, the singular value decomposition (SVD) method is used to analyze the interactions under different electrical parameters, drawing a conclusion that the interactions will be strengthened when the electrical distances are decreased. The simulation results verify the effectiveness of the proposed model and the SVD method.

This work is supported by the Science and Technology Project of the State Grid (No. 2012515).

Key words: distribution network; DFACTS; SVC; singular value decomposition (SVD); interaction

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0103-07

0 引言

随着配电系统中敏感负荷的大量投入使用,用户对优质电能质量尤其是电压质量提出了更高更严的要求^[1]。DFACTS技术又称用户电力(Custom Power)技术,是电力电子技术和现代控制技术在配电系统中的应用,目前已成为改善配电系统电能质量的有力工具^[2]。作为DFACTS技术核心装置之一的配电网静止无功补偿器(DSVC)能够综合治理电压波动与闪变、电压跌落、三相不平衡等电能质量问题,在配电系统中的应用最为广泛^[3-6]。随着在配电系统中投入使用的DSVC装置的日益增多,多个DSVC控制器间存在交互影响的问题将日益引起人们的广泛关注。

近年来,已有不少学者对于多个FACTS控制器间的交互影响做了大量研究。文献[7]运用规范形(Normal Form, NF)方法针对系统中装设的多个SVC间的交互影响问题进行了研究,并且引入了非线性交互指标来定量地评价了交互影响的强烈程度;文献[8]则建立了不同于Phillips-Heffron模型的含SVC和STATCOM的多机电力系统线性化模型,并运用相对增益矩阵(Relative Gain Array, RGA)方法进行交互影响分析,找出了两台SVC之间、SVC和STATCOM之间的负交互影响与电气距离的关系;文献[9]运用基于Gramian的交互分析方法对系统电气距离和负荷不同情况下SVC和TCSC之间的交互影响进行了分析。上述文献研究表明,相同类型和不同类型的多台FACTS装置之间确实存在交互影响,严重时可能导致控制器性能恶化,甚至导致系统失稳。一般地,我们可以将DFACTS设备理解为

基金项目: 国家电网公司科技项目(2012515)

FACTS设备的缩小版,其原理、结构均相同,功能也相似。因此,DFACTS设备控制器间存在负交互影响的问题应该引起重视。然而,对于多个DFACTS控制器之间存在交互影响问题的研究国内外还鲜见报道。

SVD是广泛应用于线性动态系统的辨识、最佳逼近和试验数据处理等问题的一个强有力的工具,同时也逐渐受到了电力系统研究人员的重视。文献[10]利用最小奇异值评定了二级电压控制的效果,通过增大系统的最小奇异值提高系统的稳定性;文献[11]运用奇异值分解对电能质量信号进行去噪,通过奇异值分解滤除了有害噪声的干扰,并有效地保留了原始扰动特征。近年来,SVD方法也成功地应用到了FACTS控制器间的交互影响分析研究领域[12-13]。

本文首先建立了含两台DSVC的单负荷无穷大配电系统线性化模型,并在此模型的基础上推导得出所研究系统的传递函数;然后,针对不同系统参数进行SVD计算,得到交互影响指标 θ 和条件数 κ ,并通过分析找出了两台DSVC间的电气距离与控制器交互影响程度的关系;最后,通过时域仿真,验证了所建模型的正确性及SVD方法的有效性。

1 含有两台DSVC的单负荷无穷大配电系统模型的描述

1.1 数学模型

感应电动机负荷是配电系统中的主要负荷^[14],采用感应电动机模型作为配电系统动态负荷模型。感应电动机采用三阶机电暂态的模型^[15],如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q + \omega_0 s E'_q] \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d - \omega_0 s E'_d] \\ \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} (T_m - T_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为转子滑差; T' 为暂态开路时间常数; X 为同步电抗; X' 为暂态电抗; ω_0 为同步转速; T_j 为转子惯性时间常数; T_e 为感应电动机电磁力矩; T_m 为感应电动机机械力矩,表达式为

$$T_m = k[a + (1-a)(1-s)^\rho]$$

其中: a 为恒力矩部分; $1-a$ 为滑差 s 有关的力矩部分; ρ 为电动机的负荷机械特性有关的指数; k

为负荷系数。

配电系统中常用DSVC来抑制电压波动和闪变,控制节点电压,这里DSVC的模型采用晶闸管控制电抗器并联固定电容器(TCR+FC)型。

TCR的等效导纳为^[16]

$$B_{\text{TCR}} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L}$$

式中, α 为晶闸管触发角,取值范围为 $\pi/2 \sim \pi$ 。

不失一般性,取固定电容 $X_C = X_L$,则有

$$Y_{\text{DSVC}} = jB_{\text{DSVC}} = (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) / j\pi X_C \quad (2)$$

1.2 单负荷无穷大配电系统模型的建立

含两台DSVC的单感应电动机负荷无穷大配电系统模型如图1所示。系统参数为: $X_1 = X_2 = 0.3$, $X_3 = 0.2$, $V_e = 1.0$,电动机参数见表1。

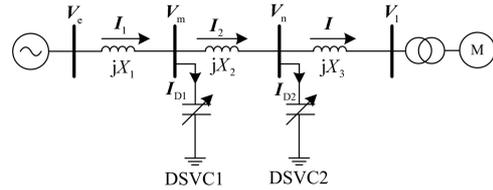


图1 含有两台DSVC的单负荷无穷大配电系统

Fig. 1 A single-load infinite-bus distribution system installed with two DSVC

表1 感应电动机负荷模型参数

Table 1 Parameters of induction motor

R_s	R_r	X_s	X_r	T_j	X_m	a	ρ	s_0
0.035	0.048	0.094	0.163	2	2.8	0.15	2	0.014

分别选择DSVC的晶闸管触发角 α_1 和 α_2 为输入变量,DSVC所在母线电压 V_m 、 V_n 为输出变量。无穷大电源电压

$$V_e = V_e \angle 0^\circ \quad (3)$$

由图1可知

$$V_n = V_1 + jX_3 I \quad (4)$$

而 $V_1 = E'_d - X' I_q + j(E'_q + X' I_d)$,代入式(4)得

$$V_n = E'_d - X_{11} I_q + j(E'_q + X_{11} I_d) \quad (5)$$

式中, $X_{11} = X' + X_3$ 。

又由图1,根据基尔霍夫电压、电流定律可知

$$I_2 = I + I_{D2} = I + jV_n B_{\text{DSVC2}} \quad (6)$$

$$V_m = V_n + jX_2 I_2 \quad (7)$$

$$I_1 = I_2 + I_{D1} = I_2 + jV_m B_{\text{DSVC1}} \quad (8)$$

$$V_e = V_m + jX_1 I_1 \quad (9)$$

联立式(3)~式(9), 解得

$$I_d = -\frac{(1-X_A B_{\text{DSVC2}} - X_1 B_{\text{DSVC1}} + X_1 X_2 B_{\text{DSVC1}} B_{\text{DSVC2}}) E'_d}{X_B - X_C B_{\text{DSVC2}} - X_D B_{\text{DSVC1}} + X_1^2 X_2 B_{\text{DSVC1}} B_{\text{DSVC2}}} \quad (10)$$

$$I_q = \frac{(1-X_A B_{\text{DSVC2}} - X_1 B_{\text{DSVC1}} + X_1 X_2 B_{\text{DSVC1}} B_{\text{DSVC2}}) E'_d - V_e}{X_B - X_C B_{\text{DSVC2}} - X_D B_{\text{DSVC1}} + X_1^2 X_2 B_{\text{DSVC1}} B_{\text{DSVC2}}}$$

式中: $X_A = X_1 + X_2$; $X_B = X_1 + X_2 + X_{11}$;

$$X_C = (X_1 + X_2) X_{11}; \quad X_D = X_1 (X_2 + X_{11}).$$

首先, 对式(10)进行线性化得

$$\Delta I = \mathbf{J} \Delta E'_d + \mathbf{K} \Delta E'_q + \mathbf{L} \Delta s + \mathbf{M} \Delta \alpha_1 + \mathbf{N} \Delta \alpha_2 \quad (11)$$

式中: $\mathbf{J} = \partial I / \partial E'_d$, $\mathbf{K} = \partial I / \partial E'_q$, $\mathbf{L} = \partial I / \partial s$,

$\mathbf{M} = \partial I / \partial \alpha_1$, $\mathbf{N} = \partial I / \partial \alpha_2$.

然后, 线性化式(1)可以得到含两台 DSVC 的单负荷无穷大配电系统的线性化模型为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}'_d &= -\frac{1}{T'} [\Delta E'_d + (X - X') \Delta I_q + \omega_0 E'_{q0} \Delta s + \omega_0 s_0 \Delta E'_q] \\ \Delta \dot{E}'_q &= -\frac{1}{T'} [\Delta E'_q - (X - X') \Delta I_d - \omega_0 E'_{d0} \Delta s + \omega_0 s_0 \Delta E'_d] \\ \Delta \dot{s} &= \frac{1}{T_j} (\Delta T_m - \Delta T_e) \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$\Delta T_m = k \rho (1-a) (1-s_0)^{\rho-1} \Delta s$$

$$\Delta T_e = I_{d0} \Delta E'_d + E'_{d0} \Delta I_d + I_{q0} \Delta E'_q + E'_{q0} \Delta I_q$$

线性化式(5), 对于装设 DSVC2 的节点 n, 有 $\Delta V_n = (\Delta E'_d - X_{11} \Delta I_d) + j(\Delta E'_q + X_{11} \Delta I_q) = \Delta V_{nd} + j \Delta V_{nq}$

$$\text{则 } \Delta V_n = (V_{d0} / V_{n0}) \Delta V_d + (V_{nq0} / V_{n0}) \Delta V_{nq} \quad (13)$$

同理, 线性化式(7), 对于装设 DSVC1 的 m 节点, 有

$$\Delta V_m = \Delta V_n + j X_2 (\Delta I + \Delta I_{\text{DST}}) = \Delta V_{md} + j \Delta V_{mq}$$

即

$$\Delta V_m = (V_{md0} / V_{m0}) \Delta V_{md} + (V_{mq0} / V_{m0}) \Delta V_{mq} \quad (14)$$

将式(11)代入式(12)~式(14), 整理可得含两台 DSVC 的单负荷无穷大配电系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Delta \mathbf{x} = [\Delta E'_d \quad \Delta E'_q \quad \Delta s]^T$; $\Delta \mathbf{y} = [\Delta V_m \quad \Delta V_n]^T$;
 $\Delta \mathbf{u} = [\Delta \alpha_1 \quad \Delta \alpha_2]^T$; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 为系数矩阵, 分别表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \partial \Delta \dot{E}'_d / \partial \Delta E'_d & \partial \Delta \dot{E}'_d / \partial \Delta E'_q & \partial \Delta \dot{E}'_d / \partial \Delta s \\ \partial \Delta \dot{E}'_q / \partial \Delta E'_d & \partial \Delta \dot{E}'_q / \partial \Delta E'_q & \partial \Delta \dot{E}'_q / \partial \Delta s \\ \partial \Delta \dot{s} / \partial \Delta E'_d & \partial \Delta \dot{s} / \partial \Delta E'_q & \partial \Delta \dot{s} / \partial \Delta s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \partial \Delta \dot{E}'_d / \partial \Delta \alpha_1 & \partial \Delta \dot{E}'_d / \partial \Delta \alpha_2 \\ \partial \Delta \dot{E}'_q / \partial \Delta \alpha_1 & \partial \Delta \dot{E}'_q / \partial \Delta \alpha_2 \\ \partial \Delta \dot{s} / \partial \Delta \alpha_1 & \partial \Delta \dot{s} / \partial \Delta \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \partial \Delta V_m / \partial \Delta E'_d & \partial \Delta V_m / \partial \Delta E'_q & \partial \Delta V_m / \partial \Delta s \\ \partial \Delta V_n / \partial \Delta E'_d & \partial \Delta V_n / \partial \Delta E'_q & \partial \Delta V_n / \partial \Delta s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \partial \Delta V_m / \partial \Delta \alpha_1 & \partial \Delta V_m / \partial \Delta \alpha_2 \\ \partial \Delta V_n / \partial \Delta \alpha_1 & \partial \Delta V_n / \partial \Delta \alpha_2 \end{bmatrix}$$

将式(15)转化到频域, 可以得到系统传递函数矩阵为

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C} (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (16)$$

通过上述推导建立的含两台 DSVC 的单负荷无穷大配电系统线性化模型, 考虑了以感应电动机为例的动态负荷, 列写了系统的微分代数方程组, 通过线性化得到了系统的状态空间模型, 并通过简单的矩阵运算得到了系统的传递函数矩阵, 为下一步的基于 SVD 方法的两台 DSVC 之间的交互影响分析奠定了基础。

2 基于 SVD 方法的两台 DSVC 间交互影响分析

2.1 SVD 分析方法

2.1.1 基本原理

矩阵 \mathbf{A} 的奇异值可定义^[17]为: 设 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{m \times n}$, 矩阵 $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ 的特征值为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$ (r 为矩阵 \mathbf{A} 的秩), $\lambda_{r+1} = \lambda_{r+2} = \dots = \lambda_n = 0$, 称 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ ($i=1, 2, \dots, r, \dots, n$) 为矩阵 \mathbf{A} 的奇异值, 简称 \mathbf{A} 的奇值。

矩阵的奇异值分解: 对于 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{m \times n}$, 存在酉矩阵 $\mathbf{Z} \in \mathbf{C}^{m \times m}$, $\mathbf{V} \in \mathbf{C}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z} \begin{pmatrix} \Delta & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{V}^T$$

其中: $\Delta = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ 为 \mathbf{A} 的奇异值。 $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_r, \dots, \mathbf{z}_m]$, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_r, \dots, \mathbf{v}_n]$, 分别为矩阵 \mathbf{A} 的左、右奇异向量, 且分别构成酉空间的标准正交基底。

2.1.2 SVD 方法在控制系统中的应用

对于一个 m 输入 m 输出系统, 其传递函数矩阵 $\mathbf{G}(s)$ 可以分解为

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{Z}(s) \mathbf{A}(s) \mathbf{V}(s)^T \quad (17)$$

由于 $\mathbf{Z}(s)$ 和 $\mathbf{V}(s)$ 分别构成酉空间的标准正交基底, 这里 $\mathbf{G}(s)$ 可以表示为

$$\mathbf{G}(s) = \sum_{i=1}^m \sigma_i(s) \mathbf{z}_i(s) \mathbf{v}_i(s)^T = \sum_{i=1}^m \sigma_i(s) \mathbf{W}_i(s) \quad (18)$$

而 $\mathbf{Y}(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{U}(s)$, 将式(17)代入, 则有

$$Y(s) = G(s)U(s) = Z(s)A(s)V(s)^T U(s)$$

通过以上分析, 可得系统第 k 个输出量对于第 l 个输入量间的增益为

$$g_{kl}(s) = \frac{y_k(s)}{u_l(s)} = \sum_{i=1}^m \sigma_i \langle W_i(s), E_{kl} \rangle \quad (19)$$

式中, $\langle W_i(s), E_{kl} \rangle \equiv ((e_k^m)^T \cdot z_i(s)) \cdot (v_i^T(s) \cdot e_l^m)$, e_k^m , e_l^m 均为单位矢量。

由式(19)可以看出, 奇异值 σ_i 影响 (k, l) 控制环节的相关因素为 $\langle W_i(s), E_{kl} \rangle$, 且 $|\langle W_i(s), E_{kl} \rangle| \leq 1$ 。这里, 定义

$$\theta_i = \arccos |\langle W_i(s), E_{kl} \rangle| \quad (20)$$

当 $|\langle W_i(s), E_{kl} \rangle| \equiv 1$ 时, $\theta_i \approx 0$, 代表 (k, l) 环节增益最大, 没有交互影响。也就是说, θ_i 在研究频率范围内越小越好, 说明此时系统交互影响最小。对于不同的矩阵奇异值, 可定义交互角 θ 来评价系统整体交互影响的大小, 即

$$\theta = \arccos \left[\frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2} \right]^{1/2} \quad (21)$$

当 $\theta=0$ 即 $\cos\theta=1$ 时, 表示没有交互影响; 当 $\theta=\pi/2$ 即 $\cos\theta=0$ 时, 表示向量正交, 交互影响最大。

设 σ_1 和 σ_m 分别为传递函数矩阵 $G(s)$ 的最大、最小奇异值, 则有

$$\kappa = \sigma_1 / \sigma_m \quad (22)$$

式中: κ 为条件数, 可以指示出系统定向上的程度, 如果 κ 值过大, 此时系统运行于“病态”, 因此 κ 值应尽可能地小。

2.1.3 基于 SVD 方法的交互影响分析步骤

运用SVD方法分析DFACTS控制器交互影响的步骤归纳如下:

(1) 针对需要研究的配电系统, 建立含DFACTS控制器的微分代数方程组。

(2) 线性化微分代数方程组, 得到状态空间模型, 并将状态空间模型转化为传递函数形式, 从而得到所研究系统的传递函数矩阵 $G(s)$ 。

(3) 将系统传递函数矩阵 $G(s)$ 进行奇异值分解, 求取 $G(s)$ 的奇异值, 左、右奇异矩阵 $Z(s)$ 和 $V(s)$ 。

(4) 通过式(21)和式(22)分别计算交互影响指标 θ 和条件数 κ 值, 从而分析不同控制方式下交互影响的大小。

2.2 两台DSVC之间交互影响分析

本文对如图1所示的含两台DSVC的单负荷无穷大配电系统进行研究, 利用SVD方法分析两台

DSVC控制器的交互影响。由式(16)可以得到系统的传递函数矩阵 $G(s)$, 再通过式(21)和式(22)计算出基于SVD方法的交互影响指标 θ 和 κ 值。针对两台DSVC间不同电气距离进行交互影响分析, 即在保证系统参数及线路总阻抗 X_2 不变的情况下, 改变两台DSVC之间的连接阻抗 X_2 , 对 X_2 取0.1~0.5时分别计算 θ 和 κ 值, 结果如表2所示。

表2 两台DSVC间不同电气距离的 θ 和 κ 值

Table 2 Value of θ and κ with different electric distance between the two DSVC

电气距离	θ / rad	κ
$X_2=0.5$	0.617	4.83
$X_2=0.3$	0.823	6.01
$X_2=0.2$	0.940	9.37
$X_2=0.1$	1.007	20.06

从表2中可以看出, 两台DSVC之间的电气距离较大时, 计算所得的 θ 和 κ 值越小, 表示两台DSVC间的交互影响较小, 随着电气距离的减小, θ 和 κ 值逐渐增大, 也就意味着交互影响在逐渐增强。因此, 控制器间的电气距离影响着交互影响的程度, 且电气距离越小, 交互影响越大。

3 仿真结果分析

为了验证所建模型的正确性及SVD方法分析交互影响的有效性, 对如图1所示的含有两台DSVC单负荷无穷大配电系统进行时域仿真。系统中的DSVC1安装在节点 m 处, DSVC2安装在节点 n 处, 用于维持安装处的母线电压。对两台DSVC分别设计一个SISO控制器, 控制参数 α 均采用增益-时间常数交流电压控制, 即

$$\alpha = \frac{K_{\text{DSVC}}}{1 + sT_{\text{DSVC}}} (V_{\text{ref}} - V) + \alpha_0$$

其中, K_{DSVC} 、 T_{DSVC} 分别为控制器增益及时间常数。

针对如下三种情况, 分别对系统进行仿真。

(1) 两台DSVC单独设计, 在 $t=0.5$ s时, 将DSVC的参考电压 V_{ref} 由1.0 pu和1.01 pu分别增大至1.03 pu和1.04 pu, 使得电压发生阶跃, 仿真结果如图2所示, 可见控制器均达到满意的控制效果。

(2) 不考虑线路等效电阻的情况下, 保证系统其他参数不变, 取两台DSVC间不同电气距离时, 进行上述仿真, 得到如图3~图5所示的两台DSVC的控制效果图。并对相应的最大电压波动值进行了计算, 结果由表3给出。

(3) 由于配电线路不能简单等值为电抗, 电阻分量不能忽略。考虑电阻分量后, 在不同电气距

离下对系统进行仿真, 得到如图6~图8所示的仿真图。其相应的最大电压波动值如表4所示。

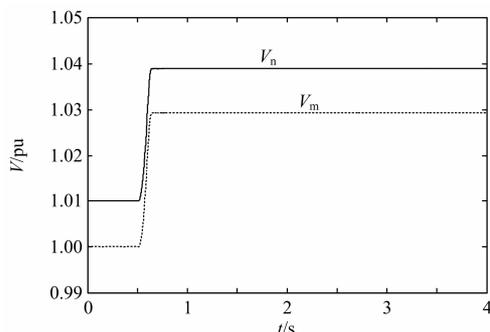


图 2 单独作用时的控制效果图

Fig. 2 Control performance of the separate effect

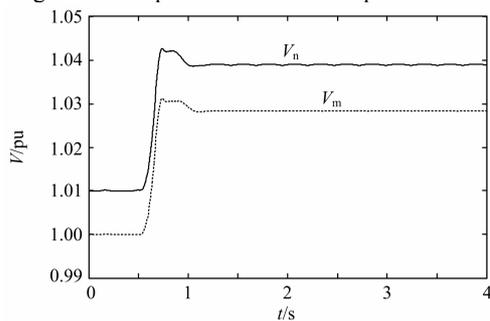


图 3 $X_2=0.5$ 时, 两台 DSVC 联合运行时节点电压

Fig. 3 Bus voltage when two DSVC operate together with the electric distance when $X_2=0.5$

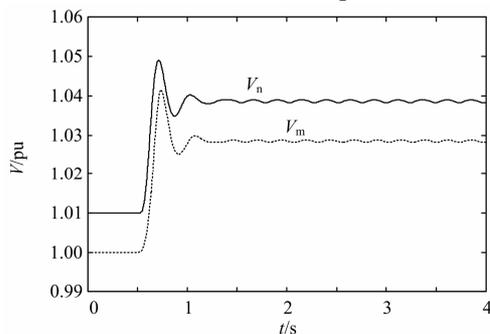


图 4 $X_2=0.3$ 时, 两台 DSVC 联合运行时节点电压

Fig. 4 Bus voltage when two DSVC operate together with the electric distance when $X_2=0.3$

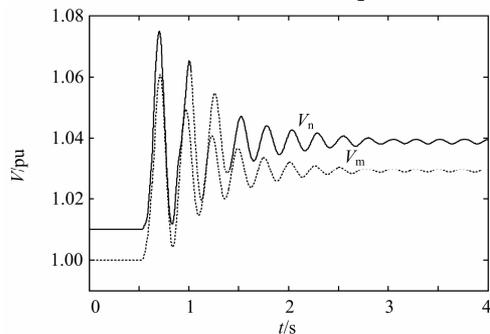


图 5 $X_2=0.1$ 时, 两台 DSVC 联合运行时节点电压

Fig. 5 Bus voltage when two DSVC operate together with the electric distance when $X_2=0.1$

表 3 不同电气距离下的 m 和 n 节点的电压波动(忽略 R)

Table 3 Voltage fluctuation of bus m and n in different electric

distance (ignoring the resistance)

电气距离	m 节点电压波动值 $d_{max}/\%$	n 节点电压波动值 $d_{max}/\%$
$X_2=0.5$	0.29	0.38
$X_2=0.3$	1.65	1.35
$X_2=0.1$	5.58	6.06

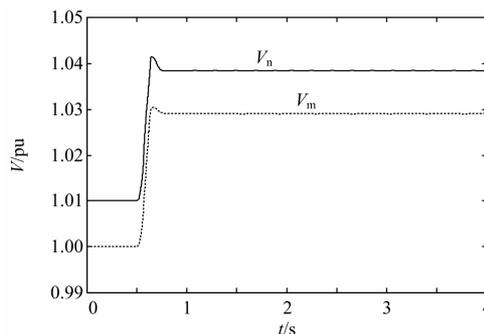


图 6 $Z_2=0.5+j0.5$ 时, 两台 DSVC 联合运行时节点电压

Fig. 6 Bus voltage when two DSVC operate together with the electric distance when $Z_2=0.5+j0.5$

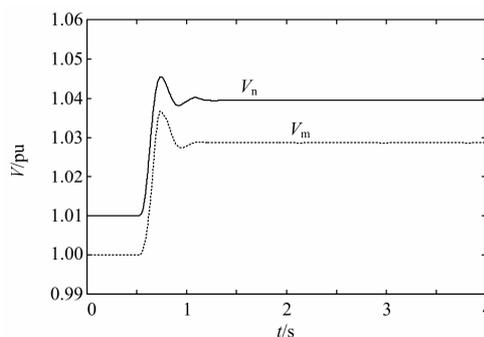


图 7 $Z_2=0.3+j0.3$ 时, 两台 DSVC 联合运行时节点电压

Fig. 7 Bus voltage when two DSVC operate together with the electric distance when $Z_2=0.3+j0.3$

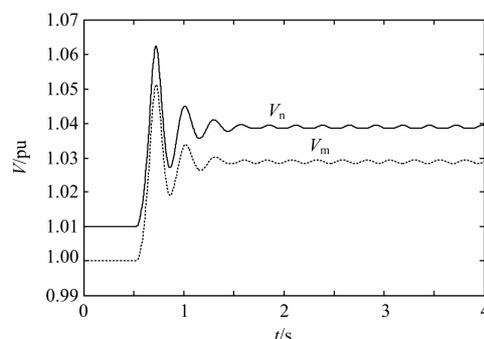


图 8 $Z_2=0.1+j0.1$ 时, 两台 DSVC 联合运行时节点电压

Fig. 8 Bus voltage when two DSVC operate together with the electric distance when $Z_2=0.1+j0.1$

表 4 不同电气距离下的 m 和 n 节点的电压波动(考虑 R)
 Table 4 Voltage fluctuation of bus m and n in different electric distance (considering the resistance)

电气距离	m 节点电压波动值	n 节点电压波动值
	$d_{max}/\%$	$d_{max}/\%$
$Z_2=0.5+j0.5$	0.24	0.34
$Z_2=0.3+j0.3$	0.97	0.87
$Z_2=0.1+j0.1$	3.11	3.46

从图 3~图 8、表 3 和表 4 可以看出, 两台 DSVC 之间电气距离较大时, 控制器间耦合较弱, 节点电压波动较小, 且很快达到稳定值, 能够较好地跟随参考电压完成阶跃, 交互影响较小; 而随着电气距离的减小, 电压波动越剧烈, 说明耦合作用增强, 控制器间交互影响也越强。仿真结果与表 2 所示的 SVD 计算结果相一致, 验证了所建单负荷无穷大配电系统线性化模型的正确性和 SVD 方法的有效性。

4 结论

随着配电系统中投入使用的 DSVC 装置数量的日益增多, DSVC 装置间的交互影响问题将受到广泛关注。本文建立了含两台 DSVC 的单电动机负荷无穷大配电系统线性模型, 根据系统状态空间模型推导出系统传递函数矩阵, 并利用 SVD 方法进行了交互影响分析, 得到了两台 DSVC 间电气距离越大负交互影响越小, 电气距离越小负交互影响就越大结论。最后, 通过时域仿真验证了 SVD 方法分析结果的正确性, 表明了所建线性化模型及 SVD 方法的有效性。

参考文献

[1] 韩英铎, 严干贵, 姜齐荣, 等. 信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 1-7.
 HAN Ying-duo, YAN Gan-gui, JIANG Qi-rong, et al. Electric power in information society and FACTS & DFACTS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 1-7.

[2] 徐政, 卢强. 电力电子技术在电力系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 23-27.
 XU Zheng, LU Qiang. Application of power electronic technology in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 23-27.

[3] 蔡阳, 韦钢, 雷振. 新型不对称负荷补偿装置控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 110-114,

130.
 CAI Yang, WEI Gang, LEI Zhen. Research on new type of asymmetric load compensator control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 110-114, 130.

[4] 刘其辉, 蔚芳, 康长路. 基于电网电压定向矢量变换的 SVC 平衡化补偿策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 147-153.
 LIU Qi-hui, WEI Fang, KANG Chang-lu. Balancing compensation strategy of SVC based on grid-voltage-oriented vector transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 147-153.

[5] 帅智康, 罗安, 吴传平. 一种低成本动态无功补偿装置及两级协同优化运行方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 162-170.
 SHUAI Zhi-kang, LUO An, WU Chuan-ping. A novel low-cost dynamic var compensator and two-level collaborative optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 162-170.

[6] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 189-194.
 ZHANG Ding-hua, GUI Wei-hua, WANG Wei-an, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 189-194.

[7] 邹振宇, 江全元, 曹一家, 等. 基于规范形方法的多台 SVC 交互影响分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8): 13-17.
 ZOU Zhen-yu, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia, et al. Interactions analysis among multiple SVC controllers in power system based on normal form[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(8): 13-17.

[8] 李海琛, 董萍, 刘明波, 等. 基于线性化模型的含 FACTS 装置的电力系统相对增益矩阵求解及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 76-82.
 LI Hai-chen, DONG Ping, LIU Ming-bo, et al. Solving and application of relative gain array in power system with FACTS devices installation based on linear model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 76-82.

[9] 杨伟, 曲艺, 顾明星. 基于 Gramian 的电力系统 FACTS 元件交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制,

- 2011, 39(22): 30-34.
- YANG Wei, QU Yi, GU Ming-xing. Using Gramian to analyze the mutual influence of power system with FACTS[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 30-34.
- [10] 刘锋, 姚小寅, 孙元章. 用奇异值分解法对二级电压控制效果的分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 1-4.
- LIU Feng, YAO Xiao-yin, SUN Yuan-zhang. Analysis on the effects of secondary voltage control by singular decomposition method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 1-4.
- [11] 胡卫红, 舒泓, 栾宇光. 基于奇异值分解的电能质量信号去噪[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 30-33.
- HU Wei-hong, SHU Hong, LUAN Yu-guang. Power quality signals' de-noising method based on singular value decomposition (SVD)[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 30-33.
- [12] 张琳, 曹一家. 基于奇异值分解方法的 FACTS 交互影响分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 20-23.
- ZHANG Lin, CAO Yi-jia. Analysis on the interaction of FACTS controllers based on the SVD method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 20-23.
- [13] 王平. UPFC 的仿真分析及其控制器设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- WANG Ping. UPFC simulation analyzation and its controller design[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [14] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 计及感应电动机负荷的静态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 1-7.
- SUN Hua-dong, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Static stability analysis considering induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 1-7.
- [15] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Dynamic theory and analysis of power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [16] 丁青青, 王赞基. TCR-TSC 型 SVC 的非仿射非线性控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 12-18.
- DING Qing-qing, WANG Zan-ji. A new design of TCR-TSC SVC controller based on non-affined nonlinear model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 12-18.
- [17] 徐树方. 矩阵计算的理论与方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995.
- XU Shu-fang. The theory and method of matrix computation[M]. Beijing: Peking University Press, 1995.

收稿日期: 2013-06-14; 修回日期: 2013-08-26

作者简介:

王振浩(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 长期从事电力系统自动化科技研发及教学工作; E-mail: zhenhaowang@126.com

姚艳菊(1988-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与控制;

陈继开(1977-), 男, 工学博士, 工程师, 主要研究方向为电能质量分析、微网与智能电网关键技术。