阻抗分析研究

江浩

2017 年 6 月 20 日

目录

第一章　阻抗分析综述

阻抗分析的经典文章是 Sun Jian 发表在 IEEE Trans. Power Electronics 上的 Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [1]。这篇文章引言部分的主要内容如下:

1. 本文提出了一种利用逆变器输出阻抗和电网阻抗判断系统稳定的判据。
2. 该判据是已有电压源系统判据的推广，适用于电流源系统。
3. 以单相（光伏）逆变器为算例说明本文所提出判据的正确性。

第二章 dq 轴阻抗

2.1 Wang 2017 TPEL

本文信息详见参考文献 [2]。

第三章　正负序阻抗

3.1　Rygg 2016

3.1.1　*dq* 轴与正负序相量

dq 轴相量定义如下（Park 变换）:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

正负序相量定义如下:

$$\begin{bmatrix} V_\mathrm{p} \\ V_\mathrm{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad a = \mathrm{e}^{\mathrm{j}(2/3\pi)} \tag{3.2}$$

dq 轴相量与正负序相量的关系如下:
(1)dq 轴 $\rightarrow$ 正负序:

$$\begin{bmatrix} V_\mathrm{p} \\ V_\mathrm{n} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} V_\mathrm{d} + \mathrm{j}V_\mathrm{q} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \omega_\mathrm{p} = \omega_\mathrm{dq} + \omega_1 \tag{3.3}$$

$$\begin{bmatrix} V_\mathrm{p} \\ V_\mathrm{n} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 0 \\ V_\mathrm{d} - \mathrm{j}V_\mathrm{q} \end{bmatrix}, \quad \omega_\mathrm{n} = \omega_\mathrm{dq} - \omega_1 \tag{3.4}$$

(2) 正负序 $\rightarrow$ dq 轴:

$$\begin{bmatrix} V_\mathrm{d} \\ V_\mathrm{q} \end{bmatrix} = \sqrt{6}V_\mathrm{p} \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathrm{j} \end{bmatrix}, \qquad \omega_\mathrm{dq} = \omega_\mathrm{p} - \omega_1 \tag{3.5}$$

$$\begin{bmatrix} V_\mathrm{d} \\ V_\mathrm{q} \end{bmatrix} = \sqrt{6}V_\mathrm{n} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathrm{j} \end{bmatrix}, \qquad \omega_\mathrm{dq} = \omega_\mathrm{n} + \omega_1 \tag{3.6}$$

传统正负序阻抗定义:

$$Z_{\mathrm{p}} = \frac{V_{\mathrm{p}}}{I_{\mathrm{p}}} \tag{3.7}$$

$$Z_{\mathrm{n}} = \frac{V_{\mathrm{n}}}{I_{\mathrm{n}}} \tag{3.8}$$

第四章　极坐标阻抗

4.1　三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据

本文信息详见参考文献 [3]。

4.1.1　1.1 小节动态模型阻抗的推导

原文中 (A12) 式可写为:

$$\begin{aligned} &sH_{\mathrm{pll}}(s)L_{\mathrm{f}}U\Delta\theta_{\mathrm{U}}(-I_q)+(1-G_{\mathrm{FF}}(s))\Delta U \\ &\quad+(sL_{\mathrm{f}}+H_i(s))(\cos\theta_I\Delta I-\sin\theta_I I\Delta\theta_I)=0 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned} &sH_{\mathrm{pll}}(s)L_{\mathrm{f}}U\Delta\theta_{\mathrm{U}}I_d+(1-G_{\mathrm{FF}}(s))U\Delta\theta_U \\ &\quad+(sL_{\mathrm{f}}+H_i(s))(\sin\theta_I\Delta I+\cos\theta_I I\Delta\theta_I)=0 \end{aligned} \tag{4.2}$$

将 $I_d=I_0\cos\theta_I$ 和 $I_q=I_0\sin\theta_I$ 代入以上两式，可得:

$$\begin{aligned} &-sH_{\mathrm{pll}}(s)L_{\mathrm{f}}I_0\sin\theta_I U\Delta\theta_{\mathrm{U}}+(1-G_{\mathrm{FF}}(s))\Delta U \\ &\quad+(sL_{\mathrm{f}}+H_i(s))(\cos\theta_I\Delta I-\sin\theta_I I\Delta\theta_I)=0 \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned} &sH_{\mathrm{pll}}(s)L_{\mathrm{f}}I_0\cos\theta_I U\Delta\theta_{\mathrm{U}}+(1-G_{\mathrm{FF}}(s))U\Delta\theta_U \\ &\quad+(sL_{\mathrm{f}}+H_i(s))(\sin\theta_I\Delta I+\cos\theta_I I\Delta\theta_I)=0 \end{aligned} \tag{4.4}$$

将以上两式化为用 ΔU 和 $U\Delta\theta_U$ 表示 ΔI 和 $I\Delta\theta_I$ 的形式:

$$(sL_f+H_i(s))\Delta I+(1-G_{\mathrm{FF}}(s))(\cos\theta_I\Delta U+\sin\theta_I U\Delta\theta_U)=0 \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned} &\left(sH_{\mathrm{pll}}(s)L_{\mathrm{f}}I_0+(1-G_{\mathrm{FF}}(s))\cos\theta_I\right)U\Delta\theta_U+ \\ &(1-G_{\mathrm{FF}}(s))\sin\theta_I\Delta U+(sL_f+H_i(s))I\Delta\theta_I=0 \end{aligned} \tag{4.6}$$

将原文中的 (A8)-(A10) 代入以上两式，即可得 (A13) 下面的四个阻抗表达式。

4.1.2 1.3 小节和附录 B 电网模型阻抗推导

注意文中的 xy 坐标与潮流计算中的 xy 直角坐标系不同，是以系统额定角速度 ω_0 旋转的同步坐标系，因此附录 B 在列写电感和电容的动态方程时，会出现耦合项。

1.3 小节中的式 (14) 未详细说明，现补充如下：节点 1 为逆变器 PCC 点，即图 1 中 U 所在的节点，节点 2 为线路电感和电容之间的中间节点。本式在推导时，分别对节点 1 和节点 2 列写方程，再应用大地和无穷大电源 $\Delta U = 0$ 的条件，同时注意到节点 2 为内部节点，电流始终为 0（基尔霍夫第一定律），即可得到式 (14)。

对于算例中讨论的只有线路电感的系统，式 (14) 可直接写为：

$$\Delta \boldsymbol{I}_1 = \boldsymbol{Y}_{(1,1)} \Delta \boldsymbol{U}_1 \tag{4.7}$$

4.1.3 第 2 节阻抗判据推导

式 (29) 的 2 种情况讨论中，情况 (1) 的推导部分具体如下：

$$\det\left(\frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_+ & 0 \\ 0 & Y_- \end{bmatrix}\right) = 0 \tag{4.8}$$

上式可化为：

$$\det\begin{bmatrix} \frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2} + Y_+ & -\frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2} \\ -\frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2} & \frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2} + Y_- \end{bmatrix} = 0 \tag{4.9}$$

直接计算上式的行列式，可得：

$$\frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2}\left(Y_+ + Y_-\right) = -Y_+ Y_- \tag{4.10}$$

即：

$$\det\left(\frac{Y_{\mathrm{g4}}}{2}\right)\det\left(Y_+ + Y_-\right) = -\det\left(Y_+ + Y_-\right) \tag{4.11}$$

附录

本附录对本文档中的所有文献进行汇总。

文章序号	作者	期刊/会议	年份	阻抗技术路线
[1]	Jian Sun	TPEL	2011	正负序
[3]	辛焕海	中国电机工程学报	2017	极坐标
[4]	Atle Rygg	JESTPE	2016	正负序/dq 轴

参考文献

[1] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11):3075–3078.

[2] Wang X, Harnefors L, Blaabjerg F. A unified impedance model of grid-connected voltage-source converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, PP(99):1–1.

[3] 辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据. 中国电机工程学报, 2017, 37(5):1277–1292.

[4] Rygg A, Molinas M, Zhang C, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of ac power electronic systems. IEEE Jouranl of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):1383–1396.