

DOI: 10.7667/PSPC170381

基于状态空间描述的频率相关等值阻抗和 导纳形式转换方法研究

周保荣¹, 张野¹, 张庆华², 范圣韬³, 冷永杰², 张路寅², 张东院²

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663; 2. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100;
3. Shengtao Fan Consulting, 加拿大, 温尼伯市)

摘要: 针对频率相关等值的阻抗和导纳两种表示形式, 基于状态空间描述提出了一种阻抗和导纳形式相互转换的方法。首先可以将阻抗或导纳的状态空间形式拆分为包含微分项和不包含微分项的两部分, 然后分别将两部分转换为导纳或阻抗的状态空间形式。通过算例验证了变换方法的正确性, 从而为频率相关等值给出了一种阻抗和导纳状态空间形式之间相互转换的方法。

关键词: 频率相关等值; 阻抗; 导纳; 状态空间

Study on transformation of FDNE forms between impedance and admittance based on state space description

ZHOU Baorong¹, ZHANG Ye¹, ZHANG Qinghua², FAN Shengtao³, LENG Yongjie², ZHANG Luyin², ZHANG Dongyuan²

(1. China South Power Grid International Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Integrated Electronic Systems
Lab Co., Ltd., Jinan 250100, China; 3. Shengtao Fan Consulting, Canada, Winnipeg)

Abstract: For two expression forms of Frequency-dependent Equivalent (FDNE), i.e. impedance and admittance, this paper proposes a method which transforms between impedance and admittance forms based on state space description. To achieve the transformation, the state space equation of impedance or admittance is firstly divided into differential part and the remaining part; and then these two parts are separately transformed into another form based on state space description. Last, validity is verified by example. It provides a method achieving the transformation of FDNE forms between impedance and admittance based on state space description.

This work is supported by Scientific and Technology Project of China Southern Power Grid (No. KY2015-2-0002).

Key words: frequency-dependent equivalent; impedance; admittance; state space

0 引言

电磁暂态的研究经常涉及复杂网络的建模, 为了简化计算, 提高仿真效率, 通常只会对关心的部分做详细的建模, 而对其余的部分使用等值表示。对外部系统等值表示最常用的方式是使用从端口看进去的基频短路阻抗, 为了进一步提高精度, 可以在接口处再连接一个波阻抗。由于只在基频等很窄的频带范围内是精确的, 因此这类简单的外部系统的等值表示方式只能满足比较简单的暂态研究。国内研究的机电电磁混合仿真^[1-3], 有使用这类等值。

而频率相关等值则可以更精确地反映外部系统的特性, 因此从 20 世纪 60 年代末开始, 得到了广泛的研究。频率相关等值显式地表示了外部系统阻抗, 也可以看作是一种系统识别技术, 可以更为深刻地揭示外部系统的特性。目前, 在机电电磁混合仿真中也开始逐渐使用频率相关等值技术, 文献[4]研究了电磁-机电暂态混合仿真中的频率相关网络等值。文献[5]基于频率相关网络等值进行电磁-机电暂态解耦混合仿真。文献[6]采用频率相关网络等值开发了 RTDS-TSA 异构混合仿真平台。文献[7-8]基于等值进行电磁-机电暂态混合仿真中机电侧故障的仿真。文献[9-11]将风电集群进行了电磁暂态等值, 来减少仿真计算量。文献[12]将输电网等值来增加配

基金项目: 南方电网科技项目资助 (KY2015-2-0002)

电网评估的可靠性, 基于频率相关等值技术会进一步增强评估可靠性。随着直流建设的逐步增加, 交流电网对直流的影响越来越值得关注。将频率相关等值技术用于交直流之间、直流之间以及直流与 FACTS 控制之间的相互影响机理研究^[13], 能够更清晰地描述在交直流系统中不同频率分量的交互特性, 进而便于深入研究交直流之间以及多直流之间的相互影响机理。频率相关等值技术可以应用在一些模型研究中^[14], 还可用于与频率相关的传输线保护^[15]建模研究中。目前的等值方法也存在多种方法, 如一些传统方法^[16], 以及矢量逼近的改进方法^[17-18], 其中基于矢量逼近的方法是日前获得广泛应用的方法。

频率相关等值的结果有两种常用表示形式, 即分别基于阻抗和导纳的描述。虽然采用了两种不同的描述方式, 但是由于其都是描述同一个物理系统, 因此两种表示方式之间存在一定的转换关系; 本文重点关注这两种表示形式之间的转换方法, 这样在得到其中一种形式之后可以直接转换得到另外一种表示形式。这可以简化频率相关等值模型的实现, 因为只要实现基于阻抗或导纳形式的模型, 通过两种形式等值间的转换关系, 就可以实现另外一种形式的等值模型。在有些软件包中, 比如 PSCAD/EMTDC 4.6 中, 其所实现的频率相关等值模型就仅提供了基于导纳描述的形式, 但如果在实际使用中当获得的频率等值结果为基于阻抗的形式时, 就无法直接使用该等值模块进行等值计算。这时则可以通过将阻抗形式通过转换方法先转换成导纳形式, 然后就可以直接使用 PSCAD/EMTDC 4.6 所提供的导纳形式频率相关模型实现。

由于从导纳到阻抗形式的转换过程是类似的, 本文将以从阻抗到导纳形式的转换为例进行讨论。基于有理函数多项式和状态空间形式^[19]是频率相关等值两种常用的表示方式, 由于状态空间方程更加灵活通用(尤其是在多端口网络等值时), 因此本文将以状态空间形式为基础进行讨论。针对此问题, 本文提出了一种变换方法将阻抗的状态空间形式变换为导纳的状态空间形式, 方便了阻抗形式的使用, 最后通过算例仿真验证了所提变换方法的正确性。

1 阻抗状态空间形式到导纳状态空间形式变换

通常求取的电力网络阻抗的状态空间形式^[20]如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{i}(t) \\ \mathbf{v}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{i}(t) + \mathbf{H}\dot{\mathbf{i}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{v} 、 \mathbf{i} 分别为电压电流向量; \mathbf{A} 为状态矩阵; \mathbf{B} 为输入矩阵; \mathbf{C} 为输出矩阵; \mathbf{D} 为前馈矩阵; \mathbf{H} 为微分系数矩阵。

把式(1)的电压表达式改写为如式(2)所示形式。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{i}(t) \\ \mathbf{v}_1(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{i}(t) \\ \mathbf{v}_2(t) = \mathbf{H}\dot{\mathbf{i}}(t) \\ \mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_1(t) + \mathbf{v}_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

电压表达式通过拆分之后, 状态空间变换成了包含微分项和不包含微分项的两个表达式。先实现由前两个表达式构成的阻抗状态空间形式到导纳形式的变换, 然后再单独实现微分项的变换。

1.1 不包含微分项的变换

由前两个表达式构成的状态空间为式(3)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{i}(t) \\ \mathbf{v}_1(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{i}(t) \end{cases} \quad (3)$$

把电流作为输出变量, 变换之后的状态空间形式如式(4)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{v}_1(t) \\ \mathbf{i}(t) = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{v}_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

进一步引入新的系数自定义表达式, 则式(4)变为式(5)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}'\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}'\mathbf{v}_1(t) \\ \mathbf{i}(t) = \mathbf{C}'\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}'\mathbf{v}_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} \mathbf{A}' = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C}) \\ \mathbf{B}' = \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1} \\ \mathbf{C}' = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C} \\ \mathbf{D}' = \mathbf{D}^{-1} \end{cases}$$

式(5)给出了一个将电压作为输入变量、电流作为输出变量的状态空间方程形式, 输入和输出量之间的传递函数即为系统的导纳。进一步, 令 \mathbf{T} 为由 \mathbf{A}' 的特征向量组成的矩阵, 利用矩阵 \mathbf{T} 引入新的状态变量 \mathbf{x}' , 其与原状态变量之间的关系为: $\mathbf{x} = \mathbf{T}\mathbf{x}'$, 则式(5)变换为式(6)的形式。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}'(t) = \boldsymbol{\lambda}'\mathbf{x}'(t) + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}'\mathbf{v}_1(t) \\ \mathbf{i}(t) = \mathbf{C}'\mathbf{T}\mathbf{x}'(t) + \mathbf{D}'\mathbf{v}_1(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\boldsymbol{\lambda}' = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}'\mathbf{T}$ 。

1.2 微分项的变换

对于剩余的微分项写成两端电压差的形式如式(7), 见图 1。

$$\mathbf{v}_2(t) = \mathbf{v}_k(t) - \mathbf{v}_m(t) = \mathbf{H}\dot{\mathbf{i}}(t) \quad (7)$$

式中, \mathbf{v}_k 、 \mathbf{v}_m 分别为 k 端、 m 端的电压, 其可以使用一个基于导纳的状态空间方程来表示。

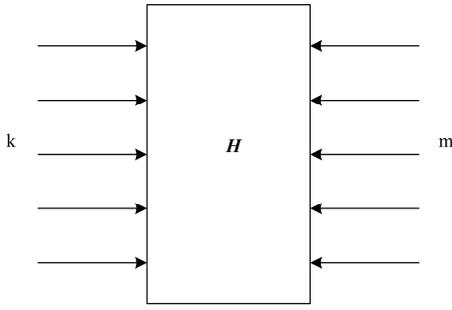


图1 微分项表示

Fig. 1 Expression of differential term

式(7)写成频域形式为式(8)，对于k端的电流写为式(9)。

$$\mathbf{v}_k(s) - \mathbf{v}_m(s) = s\mathbf{i}_k \mathbf{H}(s) \quad (8)$$

$$\mathbf{i}_k(s) = \frac{1}{s} \mathbf{H}^{-1} [\mathbf{v}_k(s) - \mathbf{v}_m(s)] \quad (9)$$

对于m端的电流如式(10)所示。

$$\mathbf{i}_m(s) = -\mathbf{i}_k(s) = -\frac{1}{s} \mathbf{H}^{-1} [\mathbf{v}_k(s) - \mathbf{v}_m(s)] \quad (10)$$

因此

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_k(s) \\ \mathbf{i}_m(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1} & -\mathbf{H}^{-1} \\ -\mathbf{H}^{-1} & \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k(s) \\ \mathbf{v}_m(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

频域形式的状态空间方程如式(12)。

$$\begin{cases} \mathbf{s}\mathbf{x}(s) = \mathbf{A}\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\mathbf{v}(s) \\ \mathbf{i}(s) = \mathbf{C}\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\mathbf{v}(s) \end{cases} \quad (12)$$

式中： \mathbf{v} 、 \mathbf{i} 分别为电压电流向量； \mathbf{A} 为状态矩阵、 \mathbf{B} 为输入矩阵； \mathbf{C} 为输出矩阵； \mathbf{D} 为前馈矩阵。

式(12)的导纳为式(13)。

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (13)$$

式(11)的导纳为式(14)。

$$\mathbf{Y}_2(s) = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1} & -\mathbf{H}^{-1} \\ -\mathbf{H}^{-1} & \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

因此对比式(13)与式(14)可以得到微分项导纳形式状态空间系数矩阵如下：

$$\begin{cases} \mathbf{A}_2 = \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 = \mathbf{I} \\ \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1} & -\mathbf{H}^{-1} \\ -\mathbf{H}^{-1} & \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix} \\ \mathbf{D}_2 = \mathbf{0} \end{cases} \quad (15)$$

2 算例验证

为了验证本文阻抗状态空间到导纳状态空间的形式变换是否正确，以IEEE14节点系统为例，基于PSCAD/EMTDC的频率相关等值模块进行仿真验证。

图2所示为IEEE14节点系统，等值的端口处为4号母线，首先将系统中的发电机断开，在相应母线处经短路阻抗接地，母线1、2、3、6、8处对应的接地电感值依次为0.000419H、0.00265H、0.00265H、0.007976H、0.007976H。求取从母线4处看进去的系统阻抗的状态空间形式作为等值模块的输入参数。下面分别从频域响应以及时域响应两个层面对比验证。

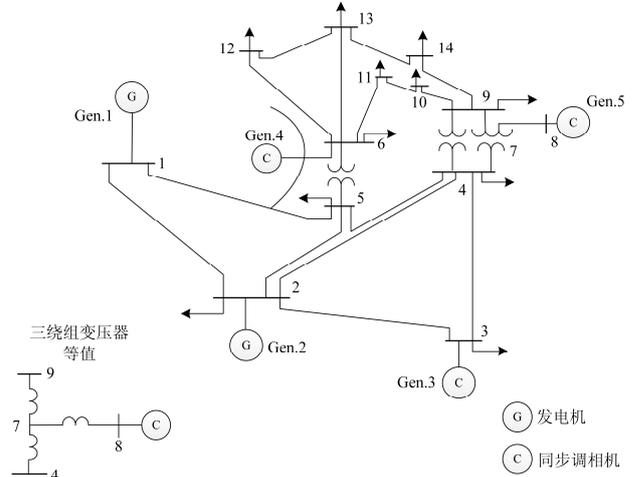


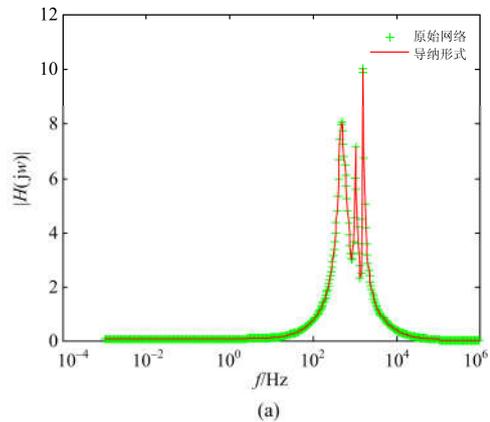
图2 IEEE14节点系统

Fig. 2 IEEE14 bus system

2.1 频域响应验证

为了在频率响应的层面验证变换方法的正确性，分别在原始网络与变换后等值模型的A相端口处自阻抗以及A、B相间互阻抗进行频率响应对比验证。图3给出了原始网络与变换后等值模型的A相自阻抗幅频特性与相频特性对比。图4给出了原始网络与变换后等值模型的A相与B相互阻抗幅频特性与相频特性对比。

由图3和图4可以看出：所给出自阻抗与互阻抗的幅频特性与相频特性也是一致的，从阻抗特性层面也说明了这种变换方法的正确性。



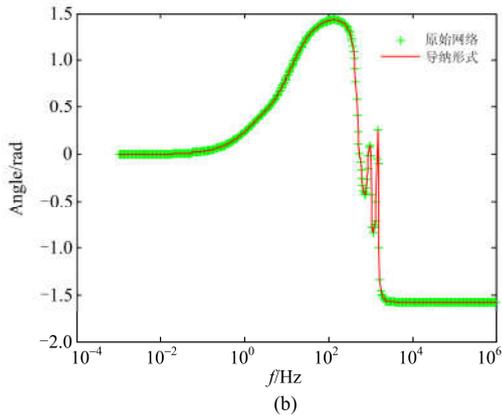


图 3 4 号母线 A 相自阻抗幅频、相频特性对比

Fig. 3 Comparison of impedance amplitude-frequency and phase-frequency characteristics (phase A at bus 4)

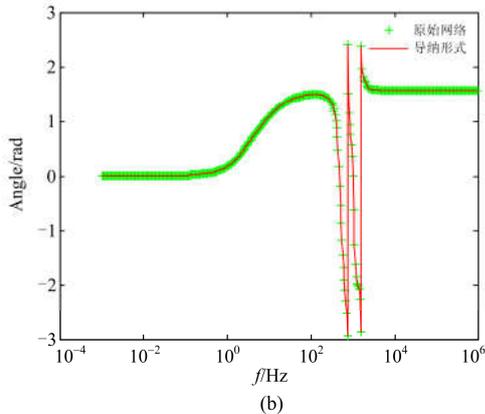
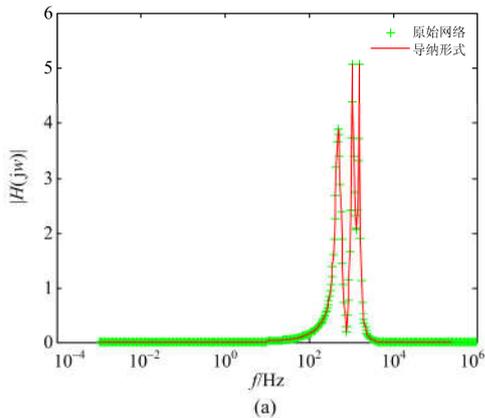


图 4 4 号母线 A 相与 B 相互阻抗幅频、相频特性对比

Fig. 4 Comparison of mutual impedance amplitude-frequency and phase-frequency characteristics (phase A and B at bus 4)

2.2 时域响应验证

为了验证变换后得到的频率相关等值模型时域响应的正确性, 分别在原始网络、等值保留的端口 A 相处均施加幅值 1 kV 的脉冲电压, 内阻抗为 $1e-4 \Omega$, 0.3 s 施加, 0.5 s 切除。图 5 和图 6 给出了等值端口处施加的电压以及产生的电流波形对比情况。

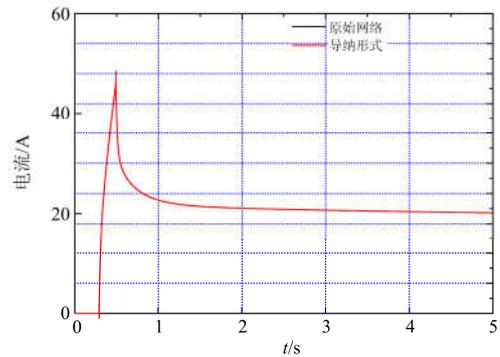


图 5 4 号母线 A 相电流波形对比

Fig. 5 Current waveform comparison of phase A at bus 4

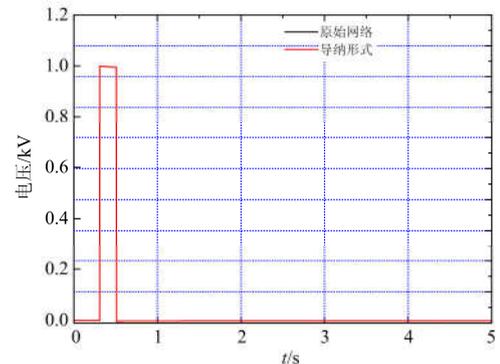


图 6 4 号母线 A 相电压波形对比

Fig. 6 Voltage waveform comparison of phase A at bus 4

由图 5、图 6 可以看出: 分别在原始网络与阻抗状态空间形式转换到导纳状态空间形式的端口处施加相同的脉冲电压, 产生的电流波形几乎完全一致。

为了进一步验证, 分别进行稳态及故障暂态对比验证。在原始系统以及等值端口母线 4 处施加线电压 230 kV、频率 60 Hz、初相角 30° 和内电阻为 0.1Ω 的三相交流电压验证变换的正确性。图 7、图 8 分别给出了原始网络与变换后等值模型的电源

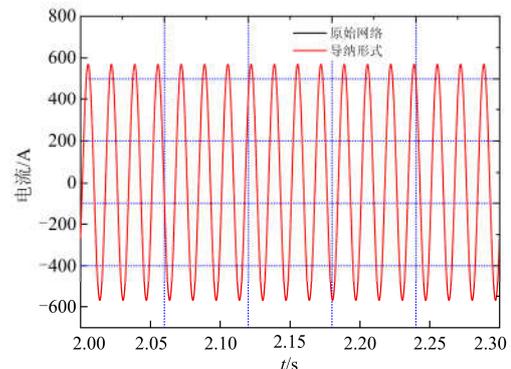


图 7 4 号母线 A 相稳态电流对比

Fig. 7 Steady state current comparison of phase A at bus 4

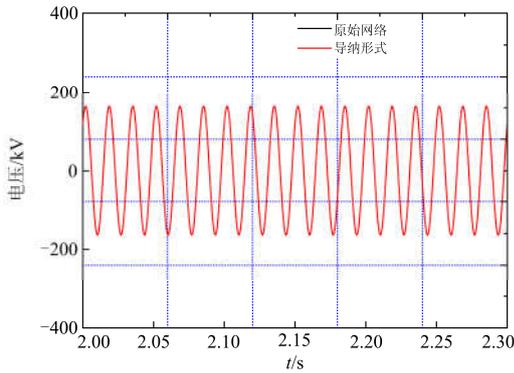


图 8 4 号母线 A 相稳态电压对比

Fig. 8 Steady state voltage comparison of phase A at bus 4

流入 4 号母线 A 相的稳态电流以及 4 号母线 A 相电压波形对比。

由图 7、图 8 可以看出：原始 IEEE14 网络与阻抗状态空间形式转换到导纳状态空间形式，计算产生的稳态电流及电压波形几乎完全一致。

在 4 号母线处施加三相短路故障，以验证变换结果的动态性能。当系统达到稳态后在 3.3 s 时施加故障，3.35 s 切除故障。图 9、图 10 分别给出了故障期间的电流、电压波形对比图。

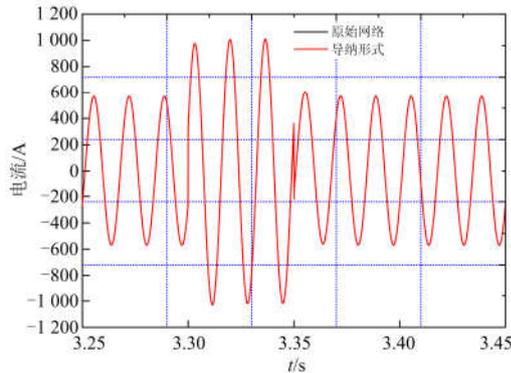


图 9 4 号母线 A 相暂态电流对比

Fig. 9 Transient current comparison of phase A at bus 4

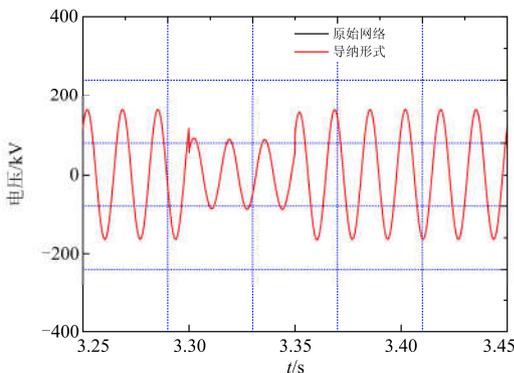


图 10 4 号母线 A 相暂态电压对比

Fig. 10 Transient voltage comparison of phase A at bus 4

由图 9、图 10 可以看出：原始 IEEE14 网络与阻抗状态空间形式转换到导纳状态空间形式，计算产生的暂态电流及电压波形同样几乎完全一致。

3 结论

基于有理函数多项式和状态空间形式是频率相关等值两种常用的表示方式，尤其在多端口网络等值时，状态空间方程更加灵活通用，因此本文以状态空间形式为基础，讨论了从阻抗和导纳形式之间的转换问题。所提出的一种变换方法可以将阻抗的状态空间形式变换为导纳的状态空间形式，同时保证系统的特性没有改变。将状态空间形式拆分为包含微分项和不包含微分项的两部分，然后分别将两部分变换为另一种形式。通过 IEEE14 节点系统算例从不同层面验证了变换方法的正确性。

参考文献

- [1] 杨洋, 肖湘宁, 陶顺, 等. 一种机电-电磁暂态混合仿真外部系统各序等值及实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 71-76.
YANG Yang, XIAO Xiangning, TAO Shun, et al. A three-sequence external system equivalent and its realization for electrometrical and electromagnetic hybrid simulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 71-76.
- [2] 朱雨晨, 赵冬梅, 刘世良, 等. 基于机电暂态-电磁暂态混合仿真的电网合环分析计算系统[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 73-79.
ZHU Yuchen, ZHAO Dongmei, LIU Shiliang, et al. Loop closing analytical calculation system based on electromagnetic-electromechanical transient simulation for power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 73-79.
- [3] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 基于 ADPSS 的高压直流输电系统机电暂态-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 136-142.
CHEN Lei, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation on HVDC power transmission system based on ADPSS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 136-142.
- [4] 张怡, 吴文传, 张伯明, 等. 电磁-机电暂态混合仿真中的频率相关网络等值[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 61-68.
ZHANG Yi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Frequency dependent network equivalent for electromagnetic and electromechanical hybrid simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 61-68.
- [5] 张怡, 吴文传, 张伯明, 等. 基于频率相关网络等值的

- 电磁-机电暂态解耦混合仿真[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 107-114.
- ZHANG Yi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Frequency dependent network equivalent based electromagnetic and electromechanical decoupled hybrid simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 107-114.
- [6] 胡一中, 吴文传, 张伯明, 等. 采用频率相关网络等值的 RTDS-TSA 异构混合仿真平台开发[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 88-93.
- HU Yizhong, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Development of a frequency dependent network equivalent based RTDS-TSA hybrid transient simulation platform with heterogeneous architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 88-93.
- [7] 张怡, 吴文传, 张伯明, 等. 电磁-机电暂态混合仿真中机电侧故障的仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 81-88.
- ZHANG Yi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Simulation method of faults on electromechanical side in electromagnetic and electromechanical hybrid simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 81-88.
- [8] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 7-14.
- SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 7-14.
- [9] 舒进, 袁剑, 都劲松. 基于锥互补法的 crowbar 投入 DFIG 风电机组电磁暂态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 122-128.
- SHU Jin, YUAN Jian, DU Jinsong. Electromagnetic transient equivalent of DFIG wind generator group with crowbar using CCA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 122-128.
- [10] 徐玉琴, 刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 108-114.
- XU Yuqin, LIU Dandan. Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 108-114.
- [11] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [12] 秦砺寒, 陈丹, 李顺昕, 等. 面向配电网可靠性评估的输电网等值方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 71-76.
- QIN Lihan, CHEN Dan, LI Shunxin, et al. An equivalent method of transmission system for distribution network reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 71-76.
- [13] 欧开健. 基于 RTDS 宽频等值的大规模交直流电网实时仿真技术探讨[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 51-53.
- OU Kaijian. On RTDS FDNE based real-time simulation technologies for the large-scale AC & DC power system[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 51-53.
- [14] MORCHED A, GUSTAVSEN B, TARTIBI M. A Universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1032-1038.
- [15] WANG Qingping, BO Zhiqian, MA Xiaowei, et al. Integrated protection based on multifrequency domain information for UHV half-wavelength AC transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 157-163. DOI: 10.1186/s41601-016-0027-8.
- [16] 林济铿, 闫贻鹏, 刘涛, 等. 电力系统电磁暂态仿真外部系统等值方法综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 108-115.
- LIN Jikeng, YAN Yipeng, LIU Tao, et al. Review on external system equivalent method for electromagnetic transient simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 108-115.
- [17] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 97-104.
- [18] GUSTAVSEN B. Fast passivity enforcement for pre-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2278-2285.
- [19] GUSTAVSEN B, DE SILVA H M J. Inclusion of rational models in an electromagnetic transients program: Y-parameters, Z-parameters, S-parameters, transfer functions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1164-1174.
- [20] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. A robust approach for system identification in the frequency domain[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1167-1173.

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-05-19

作者简介:

周保荣(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 规划设计; E-mail: zhoubr@csg.cn

张野(1986—), 男, 博士, 中级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制、柔性直流输电技术方面的研究工作。E-mail: zhangye@csg.cn

(编辑 魏小丽)