

# 一种工程实用的电力系统等值方法

朱琳<sup>1,2,3</sup>, 葛俊<sup>4</sup>, 吴学光<sup>1,2,3</sup>, 刘栋<sup>1,2,3</sup>, 张嵩<sup>5</sup>, 高路<sup>1</sup>

(1. 全球能源互联网研究院, 北京 102209; 2. 先进输电技术国家重点实验室,  
北京 102209; 3. 直流电网技术与仿真北京市重点实验室, 北京 102209;

4. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053; 5. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 硬件在环试验中, 为了兼顾仿真规模和交直流相互影响, 需要对交流系统进行等值。基于等值前后系统短路容量一致原理, 提出一种新型交流大电网等值方法。根据等值节点的短路电流构建等值发电机的额定容量及并网阻抗参数; 根据短路电流大小与系统动态特性强弱关系, 提出一种基于短路电流贡献率的新判据; 采用该判据选择等效发电机的主导控制器类型, 并计算控制器的参数; 对静态 Ward 等值进行修正, 消除负电阻及发电机有功输出为负的情况。通过算例对比等值前后系统电压、功率流动、短路容量以及故障后动态响应特性, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 短路容量; 动态等值; Ward 等值

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.025

## 0 引言

在实时数字仿真平台上搭建交流、直流混合电磁暂态模型, 并将柔性直流站级控制系统与实时数字仿真平台相接, 进行控保功能在环测试, 为工程提供技术支持<sup>[1-2]</sup>。2015年底, 厦门柔性直流输电系统已经成功投运, 设计参数达到 1 000 MW/ $\pm 320$  kV。大容量柔性直流输电系统接入交流电网后, 将对电网运行特性产生重要影响<sup>[3]</sup>。为了配合控保设备进行后期测试及调控, 需要围绕直流落点对接入电网建立详细的电磁仿真模型。受算法和规模的限制, 电磁暂态规模不可能很大<sup>[4]</sup>, 如果进行完整建模, 不仅工作量巨大, 同时仿真效率也会极低。为研究同时包含交直流系统的电网动态响应特性, 需要对交流系统进行等值计算<sup>[5-6]</sup>。

从实际应用的角度, 电力系统等值可以分为静态等值和动态等值两方面。静态等值实质上是化简电力网络、确定等值网架的过程, Ward 等值法和 REI 等值法是较为常见的静态等值方法<sup>[7-8]</sup>。其中, Ward 等值法是一种严格基于数学矩阵消去理论的线性系统等值方法, 因此等值结果易出现不符合电力系统实际情况的参数, 无法在电磁暂态仿真中实现, 能否对这些参数进行优化处理, 使其符合物理规律的同时保持等值电网特性不变, 成为等值方法优劣评判的重要标准。同时, Ward 等值后系统的短路容量也无法保证, 对动态性能影响较大。在利用静态等值方法确定网络结构框

架的同时, 还需要对系统进行动态等值, 确定等值发电机及其相应的控制系统, 以保证等值网络与原始网络动态特性一致。常用的动态等值方法有同调等值法、模式等值法和估计等值法<sup>[9-12]</sup>。其中同调等值法物理透明度高, 适用于系统的非线性计算和大扰动工况, 可直接用于暂态分析。但同调等值法过度依靠计算人员的操作经验, 获得的等值模型需要依靠扰动地点、扰动类型等因素来决定, 且工作量大, 很难为复杂扰动情况制定一个最优的等值方案。因此, 急需寻找一种适用于工程应用的动态等值方法。

短路容量是对电力系统的某一母线而言的, 是母线电气性能的一个特征量, 反映了节点与系统等值发电机之间电气距离的强弱<sup>[13]</sup>。现有文献表明, 短路容量的强弱对柔性直流系统的功率传输及控制模式会有很大影响, 且同时影响风机并网的装机容量<sup>[14-15]</sup>, 因此等值后, 需要系统短路容量与原电网保持一致。文献<sup>[16]</sup>提出了基于短路电流计算的电网等值方法, 减少了计算量, 但并未涉及动态等值; 文献<sup>[17-18]</sup>考虑了短路电流的重要性, 在等值后校验了系统的短路电流。文献<sup>[19]</sup>将短路电流作为等值过程中的一个重要量化指标, 通过短路阻抗保证等值前后短路容量的一致性, 但没有考虑等值发电机控制系统及参数, 且采用的方法仍存在同调等值固有的缺点。

针对建立厦门交直流系统实时仿真模型的需要, 本文提出了一种工程实用的电力系统稳态和动态等值方法。稳态等值方面, 对 Ward 等值法进行优化, 消除了等值网络中负电阻线路和发电机有功输出为负等不合理参数, 增加了线路波阻抗特

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家电网公司科学技术项目 (SGRIZLKJ(2016)486)  
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGRIZLKJ(2016)486)

性。动态等值方面,根据短路容量一致性原则,计算等值发电机容量及等值发电机并网阻抗参数;基于短路电流贡献率,确定等值发电机主导控制系统及参数,从而得到等值发电机本体及控制系统全部参数。最后以厦门电网为仿真算例,验证了所提方法的有效性。

## 1 稳态等值方法

本文首先提出优化 Ward 等值方法,为了保证网络潮流(节点母线电压幅值和相角)不变和节点功率平衡,确保等值系统与原网络稳态潮流结果误差在允许范围内,对线路、发电机及负荷三方面 Ward 等值的结果进行修正。

**a. 线路:**首先,把等值后电阻值为负的线路转换成电阻值为正的线路,由此带来的潮流变化将通过在线路两端增加并联功率进行补偿;其次,移除一些不太符合实际的高阻抗或低功率等值线路;再次,Ward 等值的线路往往无充电电容(并联电纳),这与实际不符,需要根据等值前原始网络的平均波阻抗  $Z_{\text{avg}}$  来确定等值线路的充电电容,模拟系统线路原有的电磁分布特性。

**b. 发电机:**将等值发电机有功输出负值改为正值,并通过在发电机出口处增加 2 倍有功功率负荷进行补偿,保证发电机节点功率平衡;根据等值发电机的容量、原始系统发电机的平均利用系数以及功率因数对等值发电机的有功出力和无功出力进行修正。

**c. 负荷:**实际负荷具有一定的功率因数,等值负荷根据原始系统负荷的平均功率因数进行修正。剩余的无功负荷根据其正负拆分成并联电抗器或电容器的组合,从而确保系统负荷的功率因数等值前后一致。

上述修正过程中,系统潮流结果会产生偏差,因此每步修正后都需要对节点进行功率补偿,确保节点电压幅值和相角与修正前基本一致。补偿方法具体如下:网络内所有节点暂设为平衡节点,节点电压幅值和相角与原网络一致,通过计算平衡节点的功率,相应地对节点进行功率补偿。从而确保等值系统的稳态潮流分布结果基本与原网络一致。

## 2 动态等值方法

### 2.1 等值发电机类型判定和聚合

在大型电力系统中,由于发电机数量和种类较多,需要选取具有主导成分的发电机类型作为等值机类型,本文提出如下的等值机判定和聚合方法。

**a. 把  $N$  台发电机按照短路电流贡献率原则**

分配给  $M$  个等值发电机(简称等值机)节点。设网络中共有  $Y$  种不同类型的发电机,共计  $N$  台( $Y \leq N$ ),系统等值机节点为  $M$  个,则对于第  $j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 台发电机,分别计算其对各个等值机节点的短路电流贡献率,如果该机对第  $m$  个等值机节点的短路电流贡献率  $R_{m,j}$  最大,则将此发电机归为第  $m$  个点,属于第  $m$  个点的发电机集合记为  $G_{m,j}$ 。

**b. 对属于第  $m$  个点的发电机  $G_{m,j}$  进行分类。**按照发电机本体参数特性,每一类组成一个发电机集合,共计  $Q$  类,用集合  $C_{m,q}$  表示属于第  $m$  个点的第  $q$  类发电机。

**c. 属于第  $m$  个点的第  $q$  类发电机判定。**如果第  $q$  类发电机集合  $C_{m,q}$  中任一发电机对该点短路电流贡献率大于基准值,即:

$$R_{m,j} > R_{m,B} \quad (1)$$

则保留该发电机类型作为等值机的一种。如果

$$R_{m,j} < R_{m,B} \quad (2)$$

则忽略该发电机类型。经验证明当  $R_{m,B} = 1\%$  时能够较好地兼顾等值机数量和精度。

### 2.2 等值机参数计算

根据故障点短路电流、短路阻抗和故障前母线电压的关系可知,内部系统任意母线上的三相对称短路电流完全由所在母线正常运行时的电压相量和正序短路阻抗决定。由于等值后的发电机通常直接连接在等值节点的高压母线上,为了与实际情况相符,需要为等值发电机添加变压器和线路,如图 1 所示。

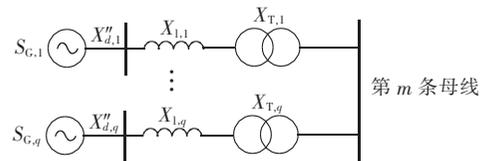


图 1 等值发电机连接电网图

Fig.1 Grid-connection of equivalent generators

下述以第  $m$  个点第  $q$  类等值机为例(假设第  $q$  类发电机满足等值机类型的判定),计算等值机、线路、变压器的正序短路阻抗。设  $S_{G,j}$  为第  $j$  台发电机的额定容量,  $X''_{d,j}$  为基于发电机本身额定容量的次暂态电抗值。采用加权平均的方式计算该点第  $q$  类等值机次暂态电抗  $X''_{d,q}$ 。

$$1/X''_{d,q} = \frac{\sum_{j \in C_{m,q}} S_{G,j}(1/X''_{d,j})}{\sum_{j \in C_{m,q}} S_{G,j}} \quad (3)$$

采用经典假设  $E = 1$  计算等值系统短路电流  $I_1$  (下述推导均是基于该理论),可得:

$$I_1 = \frac{1}{x''_{d(S_B)} + x_{T(S_B)} + x_{l(S_B)}} \quad (4)$$

其中,  $x''_{d(S_B)}$ 、 $x_{T(S_B)}$ 、 $x_{l(S_B)}$  分别为基于系统额定容量的

等值机的次暂态电抗、等值变压器电抗和等值线路电抗。设所有的发电机为理想电压源,即  $x''_{d(S_b)} = 0$ , 则可得此时等值系统短路电流  $I_2$  为:

$$I_2 = \frac{1}{x_{T(S_b)} + x_{1(S_b)}} \quad (5)$$

将式(4)与式(5)联立,可求解出:

$$x''_{d(S_b)} = \frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \quad (6)$$

其中,  $I_1$  为原系统短路电流,  $I_2$  为在原系统中将发电机次暂态电抗设为 0 后计算的短路电流, 根据等值前后短路容量一致原则,  $I_1$ 、 $I_2$  可由原系统计算得出。根据发电机短路容量与次暂态电抗的关系, 可得系统额定容量  $S_B$  与第  $q$  类等值机额定容量  $S_{M,q}$  的比值为:

$$\frac{S_B}{S_{M,q}} = \frac{x''_{d(S_b)}}{X''_{d,q}} \quad (7)$$

从而有:

$$S_{M,q} = \frac{S_B X''_{d,q}}{x''_{d(S_b)}} \quad (8)$$

考虑工程中变压器实际情况, 假设基于变压器额定容量的  $x_T = 0.1$  p.u., 且变压器的额定容量与等值机额定容量一致, 即:

$$x_{T,q(S_b)} = \frac{x_T S_B}{S_{T,q}} = \frac{0.1 S_B}{S_{M,q}} \quad (9)$$

由式(5)和式(9)求出:

$$x_{1,q(S_b)} = \frac{1}{I_2} - x_{T,q(S_b)} \quad (10)$$

由于假设  $x_T = 0.1$  p.u., 所以等值前后系统的短路容量会有一定误差, 通常可控制在 10% 之内。如果发现短路容量前后误差较大, 还可通过  $x_{1,q(S_b)}$  进行修正。

发电机的其他参数通过加权平均的方法计算, 包括等值机电纳 ( $1/x_d, 1/x_q, 1/x'_d, 1/x'_q$ )、时间常数 ( $T'_{do}, T'_{qo}, T''_{do}, T''_{qo}$ )、阻尼系数  $D$  及转动惯量  $H$ 。由此, 等值机第  $m$  个点第  $q$  类的发电机的本体参数及其并网的变压器、线路电抗均已计算完成, 其他等值机按此方法逐一计算。

### 2.3 等值机控制系统参数计算

**a.** 等值机初始控制系统及参数确定。本文提出一种快速有效的发电机控制系统参数的确定方法, 即通过主导发电机确定等值机的控制器模型和参数。主导发电机是与等值机相对应的发电机集合中具有最大短路电流贡献率的发电机。其在发电机集合中对等值前系统的动态特性影响最显著, 故而选择主导发电机的控制器模型和参数作为等值机的主要参考, 能够更充分体现原电网动态特性, 大量缩减后期调试工作。

**b.** 控制参数进一步手动调节。对等值系统进行仿真, 与原始电网动态特性一定会存在偏差, 此时可

用通过弱化励磁器调压能力和调整调速器调频能力进行修正, 直到 2 个系统的动态特性基本一致为止。本文在仿真过程中发现稳定器对仿真结果影响较小, 因此通常不做修正。

### 2.4 等值误差评价

完成上述计算后, 本文提出采用稳态误差和动态误差 2 套指标对原始系统和等值系统进行对比, 验证等值模型的有效性。

**a.** 稳态误差评价指标: 对比等值前后保留节点的母线电压及三相短路容量, 对比等值前后保留线路的功率, 使等值前后电压及功率的绝对值误差在 5% 以内, 短路容量的绝对值误差在 10% 以内。

**b.** 动态误差评价指标: 使用相对均方根误差分析方法, 即用等值后动态曲线各点绝对误差均方根与等值前曲线各点的均方根相比, 从总体上反映等值前后系统的平均偏差, 比极值误差分析等指标更能反映整体的拟合程度。根据相关的工程经验, 设定均方根误差百分比指标在 10% 以内, 即:

$$\Delta X_{\text{RMS}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{fi} - x_{li})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{fi}^2}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{fi} - x_{li})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{fi}^2}} \times 100\% \leq 10\% \quad (11)$$

其中,  $n$  为动态曲线采样点数;  $x_{fi}$  为等值前系统变量;  $x_{li}$  为等值后系统变量。

## 3 算例分析

### 3.1 系统概况

以 2015 年三华电网常规运行方式为源数据。三华电网数据中包括母线 22490 条, 发电机 2008 台, 直流线路 17 条, 发电总容量为 721453.5 MW。根据柔性直流输电工程的换流站落点及网络电气特性, 选取相关的保留节点和等值机。等值结果在实时仿真器 RT-LAB 复现, 与原电网进行对比。图 2 为原电网数据中厦门电网概况, 其中 500 kV 保留厦门、海沧, 220 kV 保留安兜、湖边、金榜、翔安、新店、英春、嵩屿。

### 3.2 稳态潮流对比

采用 Ward 进行等值, 图 3 为等值后厦门电网接线图。与图 2 中原始电网结构相比, 等值后系统基本保留了厦门电网的网架结构。

基于 Ward 等值后, 系统电压和相角应该与原系统完全保持一致, 但由于进行了上述修正和补偿, 会存在一定偏差, 电压变化情况(标么值)如表 1 所示。且因为等值后系统中只含有湖边—安兜、湖边—新



图 2 等值前厦门电网概况

Fig.2 Xiamen Power Grid before equivalence

店 2 条原始线路,所以仅对其有功功率进行对比,如表 2 所示。

### 3.3 短路容量对比

表 3 和表 4 分别为采用传统 Ward 和本文提出的优化 Ward 等值法后,系统的短路容量对比。

采用传统 Ward 等值法,母线短路容量与原电网相差较大,其中厦门 500 kV 母线绝对误差达到 77.92%,而采用优化 Ward 等值法,短路容量误差仅为 8.19%,直流落点近区翔安和湖边误差都在 3% 以下。因此,采用优化 Ward 等值法,等值后短路容量误差控制在允许范围之内,更好地保证了等值前后系统动态特性的一致性。

### 3.4 动态特性对比

基于 2.3 节提出的动态等值方法计算出等值机本体参数,并根据短路电流贡献率选择主导发电机类型,从而确定等值机控制系统的类型和初始化参数。后续通过故障波形对比对控制器参数进行手动调整,使等值前后系统的动态特性误差满足要求。

表 1 节点电压幅值对比

Table 1 Comparison of node voltages

相关节点	节点电压幅值		节点电压幅值绝对误差/%
	源数据 计算结果	等值后 计算结果	
厦门	0.960	0.957	0.3
海沧	0.961	0.963	0.2
湖边	0.965	0.959	0.6
金榜	0.965	0.959	0.6
翔安	0.966	0.967	0.1
新店	0.970	0.968	0.2
英春	0.963	0.963	0
嵩屿	0.968	0.967	0.1
安兜	0.964	0.963	0.1

表 2 线路有功功率对比

Table 2 Comparison of line active powers

线路	线路有功功率/MW		线路有功功率绝对误差/%
	源数据 计算结果	等值后 计算结果	
湖边—安兜	71.61	69.49	2.96
湖边—新店	702.28	722.64	2.90

表 3 母线短路容量对比(传统 Ward 法)

Table 3 Comparison of bus short circuit capacities (traditional Ward method)

相关节点		短路容量/(MV·A)		短路容量绝对误差/%
		源数据 计算结果	等值后 计算结果	
500kV	厦门	22503.30	4968.42	77.92
	海沧	20899.15	4925.58	76.43
	安兜	13342.69	5267.34	60.52
	湖边	13523.24	5198.64	61.56
220kV	金榜	12468.59	5114.66	58.98
	翔安	15767.80	5248.58	66.71
	新店	13780.62	5394.94	60.85
	英春	13737.57	4962.13	63.88
	嵩屿	13732.54	5371.44	60.89

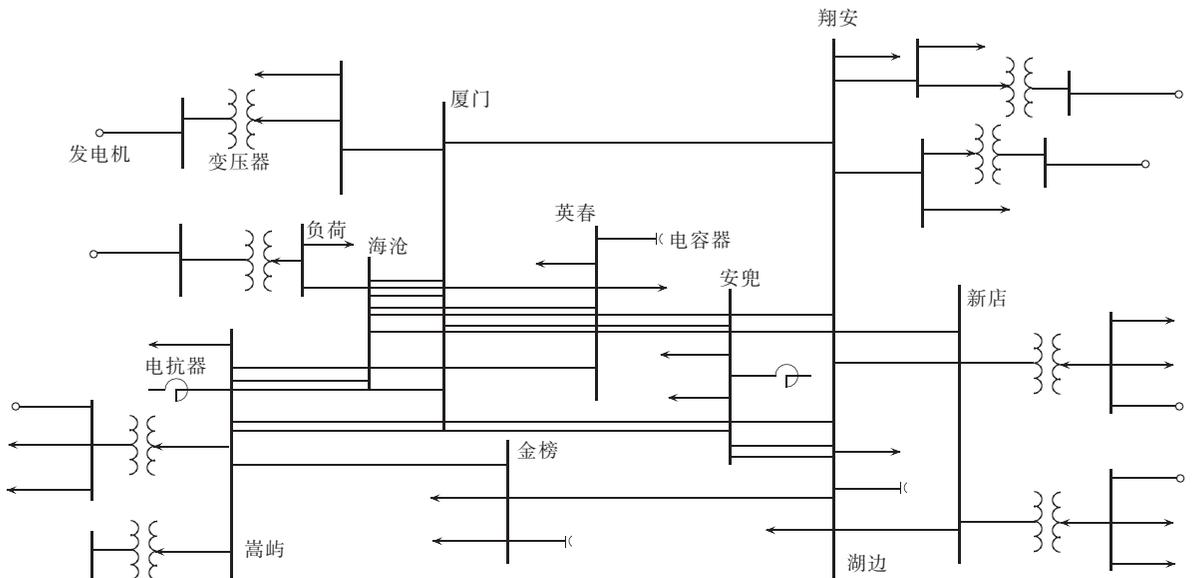


图 3 等值后厦门电网接线图

Fig.3 Xiamen Power Grid after equivalence

表 4 母线短路容量对比 (优化 Ward 法)

Table 4 Comparison of bus short circuit capacities (improved Ward method)

相关节点	短路容量/(MV·A)		短路容量绝对值误差/%	
	源数据 计算结果	等值后 计算结果		
500kV	厦门	22503.30	19760.87	8.190
	海沧	20899.15	19353.47	7.400
	安兜	13342.69	13540.29	1.480
	湖边	13523.24	13812.51	2.140
220kV	金榜	12468.59	12599.04	1.050
	翔安	15767.80	15942.50	1.110
	新店	13780.62	13938.91	1.150
	英春	13737.57	13758.68	0.150
	嵩屿	13732.54	13730.62	0.014

根据工程经验改变等值系统的动态特性,主要是通过调整等值机励磁器和调速器的控制器比例增益和时间常数来实现。

三相短路故障通常是交流系统最严重的故障,故障后近区系统电压和发电机功角可能会发生较大幅度波动,特别是发生在换流母线近区的三相短路故障,对柔性直流输电系统的影响极大,因此对其控制系统的要求更为严格。为了校验等值网络的动态响应特性,同时考虑柔性直流站级控制保护的测试需求,在换流站两侧湖边和翔安分别设置了三相瞬时短路故障,故障时间为 100 ms。

### 3.4.1 湖边三相短路故障

当湖边发生故障时,对比等值前后湖边和嵩屿母线节点电压偏差(标么值,下同),如图 4 所示。经计算可得,嵩屿节点等值前后电压均方根误差相对较大,约为 4%,远小于 10%,满足指标要求。

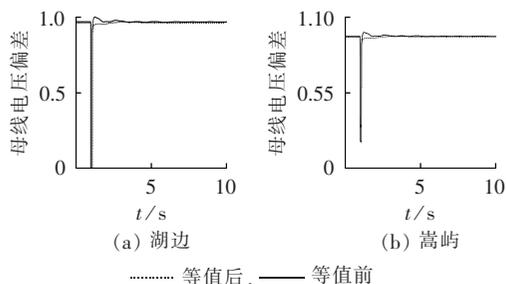


图 4 母线电压响应对比曲线

Fig.4 Comparison of bus voltage response

功率响应对比曲线如图 5 所示。由图可见,2 条线路有功功率均方根误差百分比满足要求,其中湖边—新店线路的相对误差较小。

### 3.4.2 翔安三相短路故障

当翔安发生三相短路故障时,对比等值前后翔安和新店母线电压偏差,如图 6 所示。求取各自曲线的均方根误差百分比指标,约为 6%,满足式(11)的要求。

对比等值前后湖边—安兜及湖边—新店 2 条

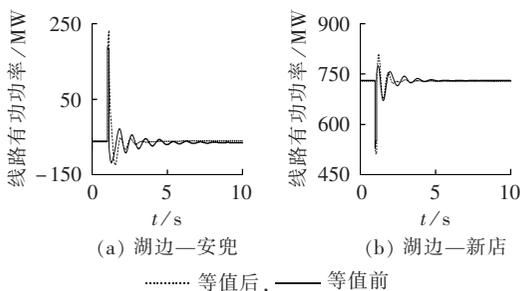


图 5 线路功率响应对比曲线 (湖边三相短路故障)

Fig.5 Comparison of line power response (to three-phase short circuit of Hubian)

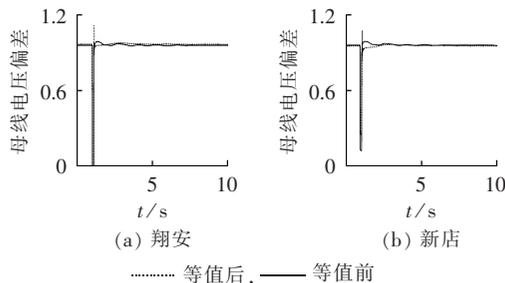


图 6 母线电压响应对比曲线

Fig.6 Comparison of bus voltage response

交流线路的有功功率响应,如图 7 所示。从图 7 可看出,翔安发生 100 ms 三相短路故障时,等值前后线路有功功率振荡趋势基本一致,功率传输恢复稳定时间基本相同,满足等值动态误差指标要求。

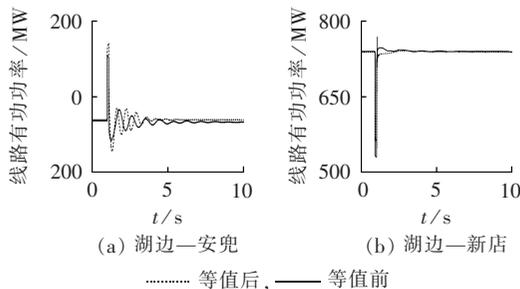


图 7 线路功率响应对比曲线 (翔安三相短路故障)

Fig.7 Comparison of line power response (to three-phase short circuit of Xiang'an)

由图 4、图 6 可以看出,基于短路容量的等值可以很好地保证系统电压的一致性,所以等值后与等值前的电压更趋平稳。而由图 5、图 7 可知,由于等值机的控制参数是手动调节,相对误差较大,所以线路的传输功率反而更趋波动。由以上分析可知,厦门交流系统等值模型的暂稳态仿真结果误差均在允许范围之内,很好地保留了原系统特性,故本文提出的基于短路容量一致性原则的动态等值法能够适用于实际工程计算。

## 4 结论

本文重点研究了适用于工程实际需要的大规模电力系统静态等值和动态等值方法,根据厦门柔

性直流工程需求,对厦门交流电网进行等值计算,比对等值前后电网响应特性,得到如下结论。

**a.** 短路容量是电力系统等值结果的关键影响因素,根据短路电流计算等值机并网参数 $x''_{d(S_b)}$ 、 $x_{T(S_b)}$ 、 $x_{1(S_b)}$ 确保等值系统的短路容量与原系统保持一致,有利于模拟等值前系统动态特性。

**b.** 根据短路电流贡献率判定等值机的主导成分,确定等值机控制系统类型。采用此方法,既能满足工程需求,又能大幅减少工作量。

**c.** 采用本文提出的优化Ward等值方法,等值后短路容量误差均在允许范围之内,关键节点达到3%,相比原有的传统Ward等值法大幅度减少。

**d.** 在实时仿真平台RT-LAB上搭建等值系统,与厦门原电网进行对比,仿真结果表明等值系统基本保留了原电网的动态特性,后续为柔性直流控制保护设备提供测试平台。

#### 参考文献:

- [1] 于亚男,金阳忻,江金元,等. 基于RT-LAB的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(19):125-130.  
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Jinyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [2] 刘栋,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):68-73.  
LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 68-73.
- [3] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-175.  
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [4] 张芳,李静远,李传栋. 含VSC-HVDC交直流混合系统机电暂态仿真研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):17-24.  
ZHANG Fang, LI Jingyuan, LI Chuandong. Electromechanical transient simulation of AC-DC hybrid systems containing VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 17-24.
- [5] 张一荻,管霖. 交直流互联电网动态等值的实用化方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):120-125.  
ZHANG Yidi, GUAN Lin. Practical dynamic equivalence of AC-DC interconnected power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 120-125.
- [6] 余娟,朱柳,颜伟,等. 基于内网实测信息的多端口外网静态等值方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):32-37.  
YU Juan, ZHU Liu, YAN Wei, et al. Static equivalence of external multi-port network based on measured information of internal network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 32-37.
- [7] 刘志文,刘明波. 基于Ward等值的多区域无功优化分解协调算法[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):63-69.  
LIU Zhiwen, LIU Mingbo. A decomposition and coordination algorithm for multi-area reactive power optimization based on Ward equivalent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 63-69.
- [8] 刘志文,刘明波. 基于REI等值的多区域无功优化并行计算[J]. 电网技术,2012,36(3):146-155.  
LIU Zhiwen, LIU Mingbo. A parallel calculation for multi-area reactive power optimization based on REI equivalent[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 146-155.
- [9] 杨靖萍,徐政. 基于同调机群识别的动态等值方法的工程应用[J]. 电网技术,2005,29(17):68-71.  
YANG Jingping, XU Zheng. Application of dynamic equivalence based on identification of coherent generator group in engineering[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 68-71.
- [10] 许剑冰,薛禹胜,张启平,等. 电力系统同调动态等值述评[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):92-95.  
XU Jianbing, XUE Yusheng, ZHANG Qiping, et al. Review on dynamic equivalence of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 92-95.
- [11] 李鹏,张保会,郝治国,等. 基于系统等值的电压控制方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):52-57.  
LI Peng, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Voltage control based on power system equivalent model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 52-57.
- [12] FENG Ma, VIJAY V. A hybrid dynamic equivalent using ANN based boundary matching technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1494-1502.
- [13] 覃芸,王延纬,徐箭. 基于短路容量的电压稳定裕度指标在湖北电网中的应用分析[J]. 广东电力,2013,26(2):10-15.  
QIN Yun, WANG Yanwei, XU Jian. Application analysis on voltage stability margin index based on short-circuit capacity in Hubei Power Grid[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(2): 10-15.
- [14] 苑宾,徐建中,赵成勇,等. 利用虚拟电阻提高接入弱交流电网的MMC小信号稳定性控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3794-3802.  
YUAN Bin, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. A virtual resistor based control strategy for enhancing the small-signal stability of MMC integrated in weak AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3794-3802.
- [15] 王伟胜,冯磊,张义斌. 风电场最大装机容量和电网短路容量的关系[J]. 国际电力,2005,9(2):31-34.  
WANG Weisheng, FENG Shuanglei, ZHANG Yibin. The relationship between wind farm maximum capacity and short-circuit capacity of the power grid[J]. International Electric Power for China, 2005, 9(2): 31-34.
- [16] 文明浩,杨帆. 基于PSASP短路计算的区域电网等值方法[J]. 电网技术,2012,36(1):113-117.  
WEN Minghao, YANG Fan. An equivalence method of regional power network based on short circuit calculation by power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 113-117.
- [17] 杨福,梁军,牛庆达. 一种适用于交直流互联系统电磁暂态仿真的动态等效方法电力系统保护与控制[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(16):70-76.  
YANG Fu, LIANG Jun, NIU Qingda. A dynamic equivalent method for electromagnetic transient simulation of AC/DC interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 70-76.

[18] 傅旭. 断相加短路故障计算的等值双端电源相分量法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11):57-60.

FU Xu. Equivalent two-source phase-domain method for open conductor plus short circuit fault calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11):57-60.

[19] 翁华, 徐政. 一种考虑短路电流指标的动态等值方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9):85-89.

WENG Hua, XU Zheng. Dynamic equivalence based on short circuit current index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9):85-89.

#### 作者简介:

朱琳(1986—), 女, 吉林辽源人, 工程师, 硕士, 主要研



朱琳

究方向为电力系统及柔性直流仿真技术  
(E-mail: zhulin@geiri.sgcc.com.cn);

葛俊(1970—), 男, 安徽肥东人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为大功率电力电子应用技术(E-mail: ge.jun@jibei.sgcc.com.cn);

吴学光(1966—), 男, 云南元谋人, 博士, 主要研究方向为高压直流输电控制策略及仿真方法(E-mail: wuxueguang@geiri.sgcc.com.cn);

刘栋(1982—), 男, 安徽宿州人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为直流电网、柔性直流输电控制级仿真技术(E-mail: liudong@geiri.sgcc.com.cn)。

### Power system equivalence for practical engineering

ZHU Lin<sup>1,2,3</sup>, GE Jun<sup>4</sup>, WU Xueguang<sup>1,2,3</sup>, LIU Dong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Song<sup>5</sup>, GAO Lu<sup>1</sup>

(1. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Beijing 102209, China;

3. Beijing Key Laboratory of DC Grid Technology and Simulation, Beijing 102209, China;

4. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100053, China;

5. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** AC system equivalence is needed in HIL(Hardware-In-Loop) test to give the considerations of simulation scale and interaction between AC and DC, for which, a method of large-scale AC system equivalence is proposed based on the principle that the short circuit capacities before and after equivalence should be consistent. The rated capacity and access reactance of equivalent generator are set according to the short circuit current of equivalent node. A new criterion is proposed based on the short circuit current contribution ratio according to the relationship between short circuit current and dynamic system characteristics, which is used to choose the dominative controller of equivalent generator and calculate the controller parameters. The static Ward equivalence is improved to eliminate the conditions of negative resistance and negative generator active power output. As an example, the system voltages, power flows and short circuit capacities before and after equivalence are compared and the post-fault dynamic response characteristics are analyzed, verifying the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** electric power systems; short circuit capacity; dynamic equivalence; Ward equivalence