

# 一种基于蒙特卡洛模拟电网运行状态的电网等效模型

随着风能、光伏等可再生能源不断加入电网，电网规模越来越大，从而使电网的运行、监视和控制变得越来越困难，效率越来越低。为了提高电网运行的效率，提出了一种电网等效的新方法。该方法以电网历史运行的基本规律为依据，通过蒙特卡洛模拟的方法作为实际电网运行的基本数据，然后，定义了等效电源、等效负荷等基本概念，在此概念的基础上，建立等效电网的基本模型，通过对该等效电网模型的优化，可以得到等效电网的优化模型。该优化模型能够为电网的未来运行、监视和控制提供有力的分析基础。通过对IEEE14和IEEE118母线系统的算例仿真，表明了所提方法的有效性。

蒋 威 陶春鸣/河南工程学院电气信息工程学院



蒋 威/讲师

## 关键词/Keywords

可再生能源·  
蒙特卡洛模拟·  
等效电源·  
等效负荷·  
等效电网·

面对可耗竭资源不断枯竭的发展趋势，风、光和储等电源以分布或集中的方式大规模地并入电网，使电网结构不断地增大，同时，电源、负荷的时空分布呈现集中和分散并存的局面，尤其是各种可再生能源以微网的形式大量存在于电网中，从而使电网的运行、监视和控制面临困难，引起了国内外电力科学工作者的高度关注，但其方法主要采用传统网络参数的化简、等效等方面<sup>[1-3]</sup>，没有依据电网运行的规律性进行电网运行、监视和控制的研究。

随着电网的运行，电网必然存在周期性的规律，而这些规律可以通过SCADA等数据不断地记录下来（或者通过由PMU引导的广域网<sup>[4-5]</sup>），并进行分析，以此为基础，可以挖掘并掌握电网的运行内在规律，从而对某些内在规律进行把握，进而实现对未来电网的运行、监视和控制。目前，尚未看到有关

通过电网运行规律来进行电网简化的方法，这也是本文的立足点。

对此，本文从学习理论的基本思想出发，采用蒙特卡洛模拟的方法模拟电网的运行情况，作为电网实际运行的历史信息，根据此信息，从而挖掘电网内在的规律，即对某些发电具有规律性输出电源的特性可以看作一个等效电源，进而简化为一个电源；同理，对于某些具有规律性的负荷，也可以看作一个等效负荷，从而简化为一个负荷。这样，整个电网就可以简化为若干个电源、负荷组成的电网，根据这些等效电源、负荷就可以进行整个电网的简化，进一步实现电网运行、监视和控制。

本文首先给出了蒙特卡洛模拟的基本过程，然后给出了等效电源、等效负荷和等效电网的基本概念，在此基本概念的引导下，提出了主宰度水平下的电网等效优化模型，从而为实现电网的运行、监视和控制提供基础。

## 非序贯蒙特卡罗动态负荷模型

### 1. 动态负荷模型

非序贯蒙特卡罗模拟法是一种利用随机数来解决具有动态随机性质问题的方法，与解析法、枚举法相比，其最大的优点是模拟采样次数与系统的规模无关，且很容易应对系统调控策略变化和诸多客观因素的扰动影响，在电力系统分析中已得到了广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。电力系统的负荷在不同时刻其数值可能是不同的，一般服从随机变化规律。本文使用

非序贯蒙特卡罗模拟法的目的是真实的构建出分布式大电网的动态性和不确定性,从而使分析结果更接近实际。

对于一个具有 $N$ 节点的分布式大电网,根据同步相量测量技术引导的广域测量系统<sup>[8-10]</sup> (Wide-area Measurement System, WAMS),可得到 $N$ 个节点过去一年 $n=8\ 760$  h的负荷数据,记为

$$\mathbf{P}=[P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_N]=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

通过对第 $i$ 负荷节点 $P_i(i=1, 2, \cdots, N)$ 8 760组数据的统计,可得到节点过去一年数据的最小值 $p_i^{\min}$ 和最大值 $p_i^{\max}(i=1, 2, \cdots, N)$ 。假设各负荷节点每年的最小值和最大值不变,则新的一年中 $t(t \in [1, 8\ 760])$ 时刻 $i(i=1, 2, \cdots, N)$ 节点的负荷 $p_{ti} \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}]$ 。假设负荷 $i$ 服从区间 $[p_i^{\min}, p_i^{\max}]$  ( $i=1, 2, \cdots, N$ )上的均匀分布,则从8 760组数据中随机抽取一组样本 $\tilde{\mathbf{P}}'=[\tilde{P}_1 \ \tilde{P}_2 \ \cdots \ \tilde{P}_N]$ ,由于负荷相量 $\tilde{\mathbf{P}}'$ 的随机变化服从多元正态分布,即: $\tilde{\mathbf{P}}'$

$\sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ ,则用非序贯蒙特卡罗方法产生 $[0, 1]$ 上服从该 $N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ 分布的概率相量 $\tilde{\mathbf{S}}'=[\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \cdots, \tilde{S}_N]$ ,得到用于潮流计算的负荷模型为

$$\tilde{\mathbf{P}}=[\tilde{S}_1 \tilde{P}_1, \tilde{S}_2 \tilde{P}_2, \cdots, \tilde{S}_N \tilde{P}_N] \quad (2)$$

由统计学中的大数定理可知,当样本数 $n \rightarrow \infty$ 时,有

$$P\{\lim_{n \rightarrow \infty} [E(\tilde{\mathbf{P}}) = \mathbf{P}]\} = 1 \quad (3)$$

即 $E(\tilde{\mathbf{P}})$ 是实际负荷 $\mathbf{P}$ 的无偏估计,但在实际应用中,抽样点数 $n$ 不可能太大,否则计算成本太高,因此可以根据实际需要合理选择样本数 $n$ 的数值,使其满足一定的误差范围。正态分布的参数相量 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}$ 分别可由式(4)、式(5)计算得到

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \bar{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \\ \vdots \\ \bar{P}_N \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n p_{i1} \\ \sum_{i=1}^n p_{i2} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n p_{iN} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \frac{1}{n-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (p_{i1} - \bar{P}_1)^2 & \sum_{i=1}^n (p_{i1} - \bar{P}_1)(p_{i2} - \bar{P}_2) & \cdots & \sum_{i=1}^n (p_{i1} - \bar{P}_1)(p_{iN} - \bar{P}_N) \\ \sum_{i=1}^n (p_{i1} - \bar{P}_1)(p_{i2} - \bar{P}_2) & \sum_{i=1}^n (p_{i2} - \bar{P}_2)^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n (p_{i2} - \bar{P}_2)(p_{iN} - \bar{P}_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n (p_{i1} - \bar{P}_1)(p_{iN} - \bar{P}_N) & \sum_{i=1}^n (p_{i2} - \bar{P}_2)(p_{iN} - \bar{P}_N) & \cdots & \sum_{i=1}^n (p_{iN} - \bar{P}_N)^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

## 2. 非序贯蒙特卡罗模拟步骤

1) 抽取样本点 $\tilde{\mathbf{P}}'$ ,并计算其正态分布概率 $\tilde{\mathbf{S}}'$ 。

2) 根据式(2)计算负荷模型 $\tilde{\mathbf{P}}$ 。

3) 重复计算步骤1)和2),选择合适的迭代次数作为终止条件,并计算此时的 $E(\tilde{\mathbf{P}})$ ,作为潮流计算的负荷值。

4) 根据获得的负荷模型进行潮流计算,得到节点电压相量 $\mathbf{U}=[U_1, U_2, \cdots, U_N]$  ( $N$ 为节点数)、支路电流相量 $\mathbf{I}=[I_1, I_2, \cdots, I_M]$ 和支路有功传输相量 $\mathbf{P}=[P_1, P_2, \cdots, P_M]$  ( $M$ 为支路数),为后续的电网等效建模提供数据。

## 电网等效模型

### 1. 概念定义

1) 等效电源。电力系统在历史某时间范围内运行过程中,对于某些具有向外输送电能的一些电源,可以视为一等效电源。这些电源距离较近,位于一发电厂或者某一设定的范围内。

2) 等效负荷。在电力系统运行的过程中,具有用电性质某些负荷,这些负荷在位置上相近,可以将其作为一等效,如在一个变电站内,或者某一设定的范围内的负荷。

3) 等效电网。由等效电源、等效负荷及其互相连接的输电元件组成的电网称为等效电网。

2. 电网主宰度度量定义

电网主宰度定义：电网形成等效电网后，起控制、支配作用的等效电网在原电网中所占的比重。

由此可知，电网主宰度 $e$ 的取值范围为： $0.5 \leq e \leq 1$ 。根据不同的主宰度，可以形成不同的等效电网，这样，就可以根据需要进行电网不同程度的等效，从而可以根据不同的需要，如调度、监视等应用，实现电网的简化，从而提高效率。

3. 电网等效模型

由上文定义的概念可推知，电网等效模型是指在一定等级的电力系统中，给定主宰度水平下，沿主网流线路上的关键电源、负荷等的连续组合。构建电网等效模型为

$$\Pi = (F, P) \tag{6}$$

$$\min : F = [f_1, f_2, \dots, f_k] \quad (k \leq K) \tag{7}$$

$$\min : P = [p_1, p_2, \dots, p_m] \quad (m \leq M) \tag{8}$$

为了量化支路传输的总有功数量，定义支路有功传输水平为

$$T_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^K f_j} \quad (i = 1, 2, \dots, K) \tag{9}$$

同理，定义负荷节点注入或消耗有功水平为

$$\begin{cases} C_i = \frac{p_i}{\sum_{j=1}^M p_j} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \\ \text{s.t. } 0.5 \leq e \leq 1 \\ \sum_{i=1}^k T_i \geq e \\ \sum_{i=1}^m C_i \geq e \end{cases} \tag{10}$$

算例分析

1. IEEE14节点算例

以IEEE14节点系统为例，对所提的电网等效模型进行检验，系统拓扑图如图1所示。

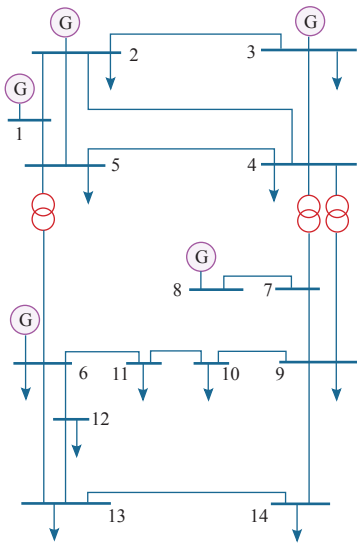


图1 IEEE14节点拓扑图

(1) 负荷模型潮流计算

按照上文非序贯蒙特卡罗模拟步骤，使用非序贯蒙特卡罗模拟法对系统进行10 000次的数据抽样并进行潮流计算，得到支路传输有功数据如表1所示，各负荷节点有功数据如表2所示。

表1 支路传输有功数据

| 支路编号 | 首节点 | 末节点 | 支路首节点至末节点传输有功量 (pu) |
|------|-----|-----|---------------------|
| 1    | 1   | 2   | 159.014             |
| 2    | 3   | 2   | -70.404 8           |
| 3    | 2   | 4   | 57.236 1            |
| 4    | 1   | 5   | 79.445              |
| 5    | 2   | 5   | 42.975 8            |
| 6    | 3   | 4   | -23.781 2           |
| 7    | 4   | 5   | -62.666 7           |
| 8    | 5   | 6   | 47.557 5            |
| 9    | 7   | 4   | -29.896 4           |
| 10   | 8   | 7   | -4.019 1            |
| 11   | 4   | 9   | 16.197 2            |
| 12   | 7   | 9   | 24.789 3            |
| 13   | 10  | 9   | -3.636 11           |
| 14   | 11  | 6   | -8.955 82           |
| 15   | 12  | 6   | -9.361 48           |
| 16   | 6   | 13  | 17.807              |
| 17   | 9   | 14  | 7.861 39            |
| 18   | 10  | 11  | -5.366 37           |
| 19   | 12  | 13  | 3.232 04            |
| 20   | 13  | 14  | 7.281 72            |
| 21   | 5   | 9   | 0                   |

(续)

| 支路编号 | 首节点 | 末节点 | 支路首节点至末节点传输有功量 (pu) |
|------|-----|-----|---------------------|
| 22   | 6   | 9   | 0                   |
| 23   | 11  | 9   | 0                   |
| 24   | 9   | 13  | 0                   |

表2 节点有功及电压数据

| 节点编号 | 注入有功 (pu) | 节点消耗有功 (pu) | 电压幅值 (pu) |
|------|-----------|-------------|-----------|
| 1    | 238.459   | 0           | 1.06      |
| 2    | 40        | 21.691      | 1.045     |
| 3    | 0         | 94.186      | 1.01      |
| 4    | 0         | 47.822      | 1.037     |
| 5    | 0         | 7.599 5     | 1.046 6   |
| 6    | 0         | 11.173      | 1.07      |
| 7    | 0         | 1.088       | 1.038 16  |
| 8    | 0         | 4.019 1     | 1.09      |
| 9    | 0         | 29.481      | 1.020 72  |
| 10   | 0         | 9.002 5     | 1.022 58  |
| 11   | 0         | 3.505       | 1.043 56  |
| 12   | 0         | 6.129 5     | 1.053 91  |
| 13   | 0         | 13.496      | 1.046 98  |
| 14   | 0         | 14.921      | 1.014 13  |

(2) 电网等效模型

根据表2数据可知系统节点是处于同一电压等级下，据此，对表1的数据按照式(9)进行计算得到如图2所示各支路有功传输水平结果。

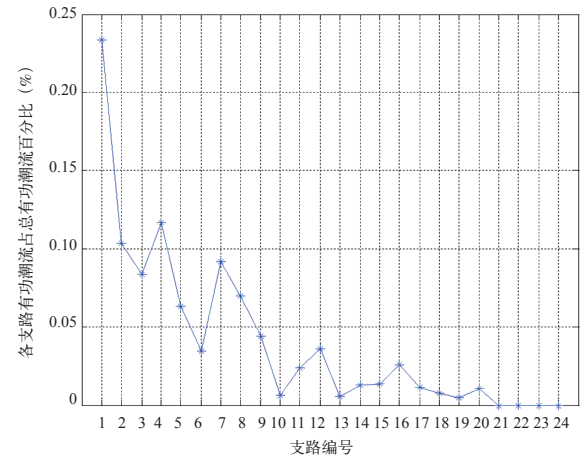


图2 各支路有功传输水平

同理，对表2的数据按照式(10)进行计算得到如图3所示负荷节点有功水平百分比结果。

在给定的主率度水平下，基于图2和图3的计算结果，对系统主网流和关键节点进行提取，得到

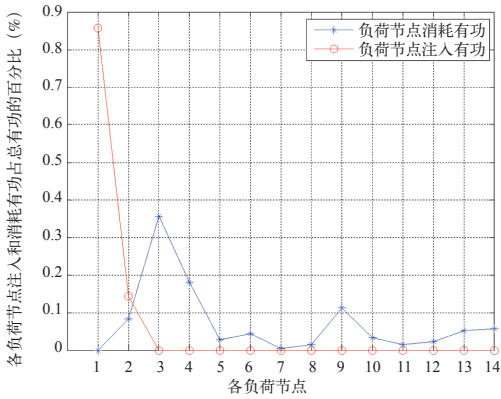


图3 负荷节点注入和消耗有功水平

表3 不同主率度下的电网等效模型

| 主率度 $e$ | 电网等效支路编号                                      | 电网等效节点编号                            |
|---------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0.6     | 1, 4, 2, 7, 3                                 | 1, 3, 4, 9                          |
| 0.7     | 1, 4, 2, 7, 3, 8, 5                           | 1, 3, 4, 9, 2                       |
| 0.8     | 1, 4, 2, 7, 3, 8, 5, 9                        | 1, 3, 4, 9, 2, 14, 13               |
| 0.9     | 1, 4, 2, 7, 3, 8, 5, 9, 12, 6, 16             | 1, 3, 4, 9, 2, 14, 13, 6, 10        |
| 0.95    | 1, 4, 2, 7, 3, 8, 5, 9, 12, 6, 16, 11, 15, 14 | 1, 3, 4, 9, 2, 14, 13, 6, 10, 5, 12 |

如表3所示电网等效模型。

2. IEEE118节点算例

进一步使用IEEE118节点标准算例对所提出的等效模型进行仿真，系统拓扑图如图4所示。

(1) 负荷模型潮流计算

同样，按照上文非序贯蒙特卡罗模拟步骤，使用蒙特卡罗模拟法对系统进行10 000次的数据抽样并进行潮流计算，对系统各支路有功传输水平进行统计，得到如图5所示的结果。

同理，按照式(10)对各负荷节点的有功注入和消耗水平进行统计，得到如图6所示的结果。

(2) 电网等效模型

在给定的主率度水平下，基于图5和图6的计算结果，对系统主网流和关键节点进行提取，得到如表4所示电网等效模型。

3. 结果分析

通过对IEEE14节点和118节点的电网等效建模结果可以看到，在不同的主率度水平下对应不同的电网等效模型，随着主率度水平的增加，网络支路和节点数也随之增加，电网结构也趋向复杂。主率度大小与电网等效关系图如图7所示。

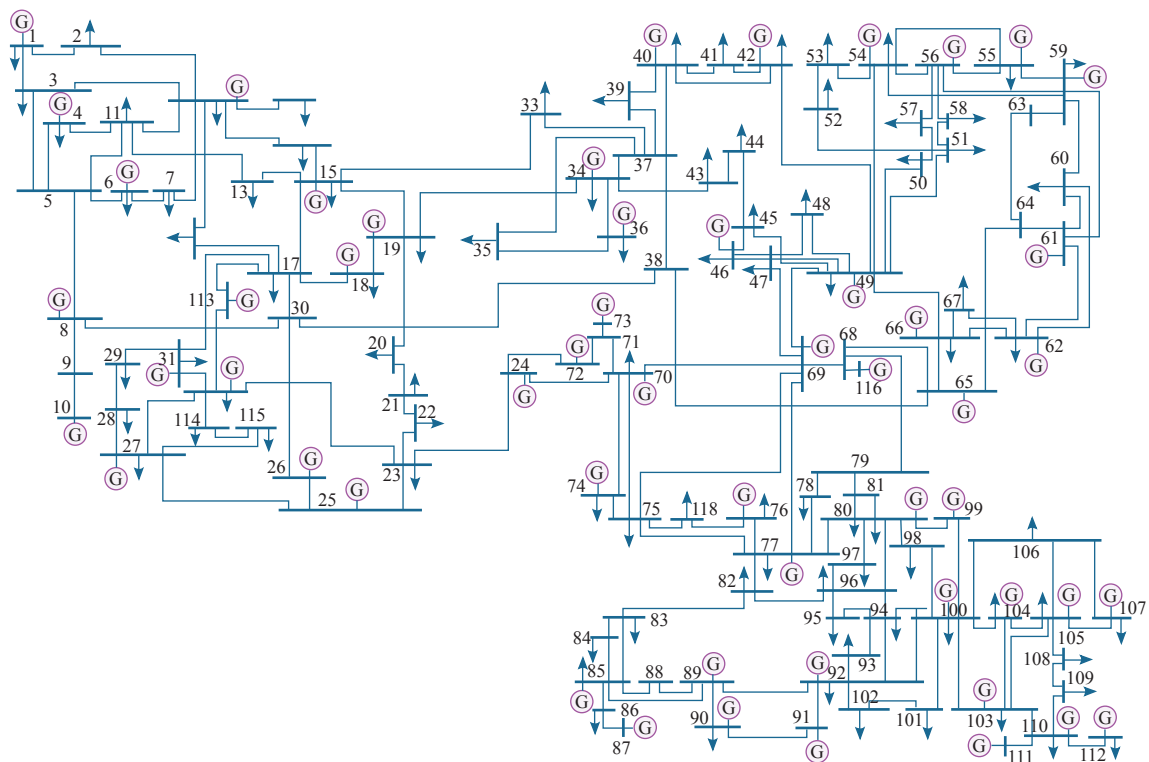


图4 IEEE118节点拓扑图

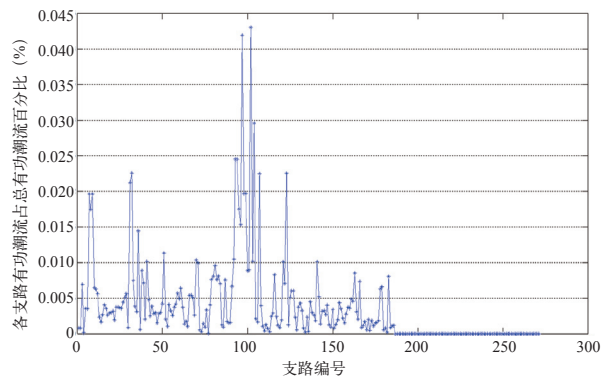


图5 各支路有功传输水平

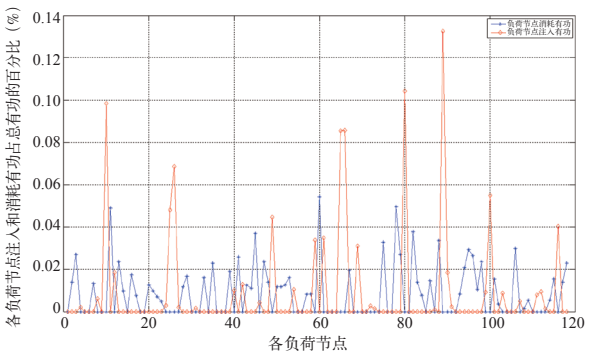
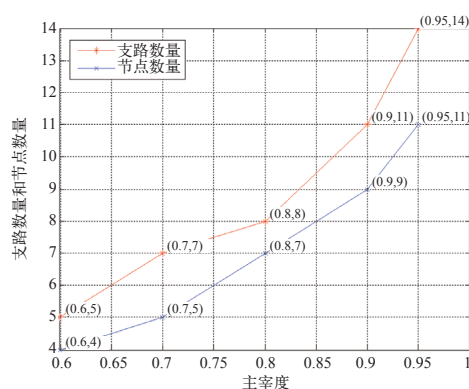


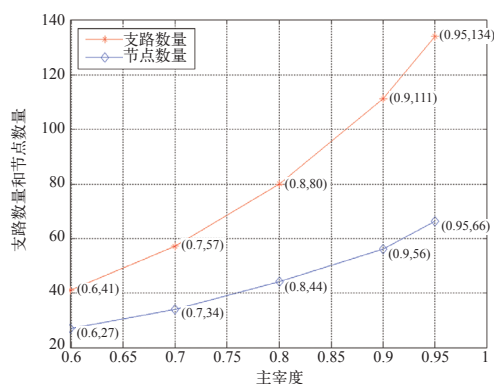
图6 负荷节点注入和消耗有功水平

表4 不同主率度下的电网等效模型

| 主率度 $e$ | 电网等效支路                                                                                                                                                                        | 电网等效节点                                                                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.6     | 102, 97, 104, 93, 94, 32, 123, 107, 31, 98, 99, 9, 7, 95, 8, 96, 36, 51, 92, 70, 103, 121, 141, 41, 71, 81, 101, 100, 38, 163, 116, 83, 183, 80, 79, 82, 87, 33, 166, 39, 122 | 60, 78, 11, 82, 45, 88, 75, 106, 95, 3, 79, 96, 41, 13, 47, 98, 35, 118, 94, 67, 89, 80, 10, 66, 65, 26, 100 |
| 0.7     | 在主率度0.6基础上新增支路: 84, 3, 91, 179, 10, 61, 11, 178, 127, 126, 59, 29, 12, 66, 67, 142                                                                                            | 在主率度0.6基础上新增节点: 39, 16, 29, 33, 53, 25, 49                                                                   |
| 0.8     | 在主率度0.7基础上新增支路: 68, 28, 125, 161, 60, 42, 162, 137, 27, 154, 131, 50, 58, 54, 16, 78, 147, 108, 44, 34, 62, 57, 159                                                           | 在主率度0.7基础上新增节点: 101, 115, 86, 48, 2, 83, 117, 116, 61, 59                                                    |
| 0.9     | 在主率度0.8基础上新增支路: 130, 24, 23, 25, 160, 26, 6, 5, 17, 155, 150, 76, 132, 145, 55, 144, 21, 164, 35, 20, 49, 46, 138, 19, 115, 48, 45, 158, 15, 146, 69                          | 在主率度0.8基础上新增节点: 7, 43, 52, 20, 50, 51, 28, 44, 69, 12, 90, 42                                                |
| 0.95    | 在主率度0.9基础上新增支路: 139, 18, 56, 43, 117, 114, 135, 13, 128, 156, 105, 165, 40, 52, 171, 120, 22, 153, 177, 173, 140, 64, 169                                                     | 在主率度0.9基础上新增节点: 97, 21, 14, 57, 58, 93, 54, 40, 112, 99                                                      |



(a) IEEE14系统主宰度与支路和节点关系



(b) IEEE118系统主宰度与支路和节点关系

图7 主宰度大小与电网等效关系

因此,对于不同的应用背景下,选择合理的主宰度水平能够显著的简化电网分析和计算,对于后续分析、监视和控制分布式大电网具有显著意义。

## 结束语

为了简化分析、监视和控制复杂的分布式大电网,本文基于非序贯蒙特卡罗方法构建出电网的负荷模型,并在此基础上提出了等效电网的定义和建模方法。该方法是基于电网运行状态而得到的,不同于传统电网结构参数的等效、化简方法,在电网实现广域化后,通过不断地积累电网的运行数据,挖掘运行数据中的内在规律,实现电网等效化简更具有实际意义,这也是目前电力系统的研究热点之一。通过在不同主宰度水平下

的等效模型进行的算例仿真分析表明,所提出的电网等效模型对于简化电网分析,提高电网的运行管理效率具有显著意义。

## 参考文献

- [1] 陈金富,陈海焱,段献忠.含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J].中国电机工程学报,2006,26(3):31-35.
- [2] 艾芊,陈陈,沈善德,等.简化前馈网络用于负荷模型参数辨识的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(5):21-27.
- [3] 颜伟,李世明,陈俊,等.基于内网实测信息的两端口外网静态等效参数估计方法[J].中国电机工程学报,2011,31(13):101-106.
- [4] 李琰,周孝信,周京阳.基于广域测量测点降阶的系统受扰轨迹预测[J].中国电机工程学报,2008,28(10):9-13.
- [5] 彭静,卢继平,汪洋,等.WAMS中的通信网络平台构建[J].电力系统保护与控制,2009,37(12):62-67.
- [6] 宋云亭,郭永基,程林.大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真[J].电网技术,2003,27(8):24-28.
- [7] 张焰.电网规划中的模糊可靠性评估方法[J].中国电机工程学报,2000,20(11):77-80.
- [8] 刘道伟,谢小荣,穆刚,等.基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J].中国电机工程学报,2005,25(1):13-17.
- [9] 段俊东,郭志忠.一种可在线确定电压稳定运行范围的方法[J].中国电机工程学报,2006,26(4):113-118.
- [10] 李琰,周孝信,周京阳.基于广域测量测点降阶的系统受扰轨迹预测[J].中国电机工程学报,2008,28(10):9-13.

(收稿日期:2014-06-24) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告