

一种新的基于关键元件的电网简化建模方法

针对风、光等可再生能源不断并入电网以及特高压直流输电工程不断建设,电网规模日益增大,因此识别电网中的关键元件并进行简化对于电网安全运行、监视具有重要意义,提出了一种基于关键元件的电网简化建模方法。首先,使用非序贯蒙特卡罗方法模拟电网的运行模式,在此基础上进行潮流计算和输电元件负载率计算,得到系统的关键元件集;然后,以电网关键元件集为端口对原系统做诺顿等效,得到以关键元件集为主的简化等效系统。通过使用该简化模型对未来时段内的电网进行监视,可以极大提高系统运行、监视的效率。通过对IEEE 14节点系统的仿真验证,表明了所提方法的有效性。

元传伟/濮阳职业技术学院



元传伟/副教授

关键词/Keywords

关键元件·
电网简化·
诺顿等效·
蒙特卡洛·

随着风、光等可再生能源以分布或集中的方式大规模地并入电网,电网规模日益庞大,使电力系统安全、可靠及经济的运行与控制变得越来越复杂;此外,电力市场正在进行解除管制的改革,分布式电源与传统电源的自由竞争使电网潮流呈现出不清晰性、不确定性,因此又加剧了这一复杂性。

面对复杂多变的系统,筛选并监视对系统安全起主宰作用的元件对于分析电网的薄弱环节^[1-3]、关注影响系统输电能力的瓶颈元件^[4-7]以及监控电网可视化中的关键部分^[8,9]具有非常重要的作用。电力系统的故障最初都是由某个或某些元件因过载而引发的一系列连锁反应,最终才导致大面积停电。为了有效减少事故的发生,提高系统安全监控

效率,将对系统安全起关键作用的部分输电元件进行简化,可以极大地简化复杂的分布式大电网的高维数据分析和多状态监控;通过对关键元件载流量主宰裕度进行研究,可以经济、安全地提高电网输电能力;此外,研究关键输电元件的简化模型,分析其在主宰区间的单调性,可以直观地解析出复杂电网关键部分的动态规律。

本文首先使用非序贯蒙特卡罗方法模拟电网的运行模式,在此基础上进行潮流计算和输电元件负载率计算,并得到系统的关键元件集;然后以电网关键元件集为端口对原系统做诺顿等效,得到以关键元件集为主的简化等效系统。该模型的建立可以有效提高系统的监视能力,满足大系统快速静态安全分析的要求。

基本概念

1. 输电元件负载率

为了获得电网关键元件,引入输电元件负载率的概念^[10],即

$$T_i = \frac{f_i}{f_{i,\max}} \quad i=1,2,\dots,M \quad (1)$$

式中, f_i 为第*i*条输电支路实际传送的有功功率量,潮流方向取实际的方向; $f_{i,\max}$ 为第*i*条输电支路本身的最大功率传送能力; M 为输电支路总数。

2. 关键元件

在某一时间断面内,电网的输电支路中具有最大负载率的输电元件集称为关键元件集^[11]。解析表示为 $\{\max(T_1, T_2, \dots, T_M)\}$,其中 $T_i(i=1, 2, \dots, M)$ 输电支路*i*的负载率。

河南省软科学研究计划项目(“远程教育个性化虚拟学习社区构建与研究”,142400410232),河南省教育厅人文社会科学研究项目资助(“个性化远程教育平台应用研究”,2014-gh-231)阶段性研究成果。

3. 主宰支路及其单调性

关键元件集中的任一元素所在的输电支路就是电网的主宰支路^[11]。在一定的运行模式下,随发电、负载的增加,若主宰支路不变,则称该主宰支路具有单调性,该单调性存在的区间称为系统的主宰区间。

4. 关键元件简化

电网关键元件的简化就是保留电网所有主宰支路的节点集,而将其他节点等效到主宰支路所在的节点集上的一种网络简化行为。

非序贯蒙特卡罗模拟系统运行模式

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^[12],在电力系统分析中已得到了广泛的应用^[13-15]。电力系统的运行模式是指某时刻发电、负载及网络结构确定的系统运行,明确电力系统某一时间段内发电、负载的变化规律,是研究电力系统潮流变化的基础,而使用非序贯蒙特卡罗方法模拟系统的运行模式可以更真实地解析系统的运行规律。

设系统负载 i 服从区间 $[D_i^{\min}, D_i^{\max}]$ ($i=1, 2, \dots, N$)上的均匀分布,使用非序贯蒙特卡罗对其进行 n 次抽样,产生相互独立的样本序列 $\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \dots, \tilde{D}_n$,计算样本序列的算术均值为

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{D}_i \quad (2)$$

根据大数定理,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{D}$ 是实际负载 D 的一个无偏估计。

同理,设系统发电机有功 j 服从区间 $[P_j^{\min}, P_j^{\max}]$ ($j=1, 2, \dots, K$)上的均匀分布,对其进行 n 次抽样,产生相互独立的样本序列 $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n$,计算其均值为

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i \quad (3)$$

同样根据大数定理,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{P}$ 是实际有功 P 的一个无偏估计。

电网关键元件简化建模

1. 关键元件集及主宰支路的获取

某一时间断面内,在既定的电网运行方式下进行潮流计算,根据式(1)计算出电网各支路的负载率,从而得到系统的关键元件集,设为 $\Gamma = \{\max(T_1, T_2, \dots, T_M)\}$ (M 为输电支路总数)。设集合 Γ 中的元素有 m 个,相应地存在 m 个关键元件及 m 条主宰支路,以 m 条主宰支路所在的节点对为端口做诺顿等效,即可完成原网络的关键元件简化,简化后的系统如图1所示。

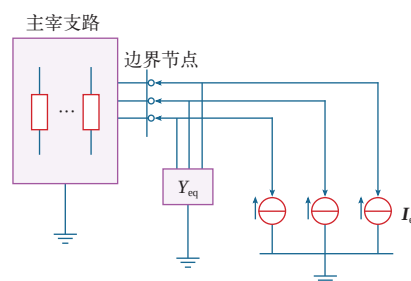


图1 网络诺顿等效

2. 电网关键元件简化

根据诺顿原理可知,无论系统如何复杂,在任意时间断面内从系统内部节点向系统看,都可以将系统等效为图2所示的一个简单两节点系统。

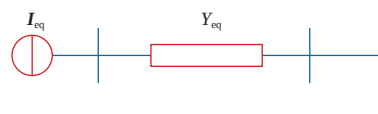


图2 网络诺顿等效

将其应用至主宰支路上,即为一條主宰支路所对应的两个节点从网络中抽取出来构成一个端口,可以在端口上做诺顿等效;对于具有多个主宰支路的节点对,可以引出多个端口,并利用叠加原理将诺顿等效推广到多端口^[16]。多端口的诺顿等效过程实际上就是保留多个边界节点,将其余节点进行高斯消去的网络化简过程,解析表达过程如下。

设网络有 N 个节点(地节点作为参考节点不包含在内), b 条支路,其中 m 条为主宰支路,记为 $k_1, k_2, \dots, k_m$,相应的节点对用 $(p_{k1}, q_{k1}), (p_{k2}, q_{k2}), \dots, (p_{km}, q_{km})$ 表示,其中每个端

口上第一个节点的电流以流出网络为正方向,第二个节点的电流以流入网络为正方向,二者大小相等;第一个节点和第二个节点之间的电压降作为电压端口的正方向,其节点-端口关联相量为

$$\mathbf{M}_{k_1} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & -1 & \cdots & 0 \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

将所有主宰支路的节点-端口关联相量按列排列,就得到了 $N \times m$ 维的节点-端口关联矩阵 $\mathbf{M}_L$

$$\mathbf{M}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{k_1} & \mathbf{M}_{k_2} & \cdots & \mathbf{M}_{k_m} \end{pmatrix} \quad (5)$$

设系统初始网络方程为

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{Z}\mathbf{I}_0 \quad (6)$$

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{Y}\mathbf{V}_0 \quad (7)$$

可得多主宰支路端口戴维南等效电路的 $m \times m$ 阶阻抗矩阵和电动势分别为

$$\mathbf{Z}_{eq} = \mathbf{M}_L^T \mathbf{Z} \mathbf{M}_L \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_{eq} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{k_1} & \mathbf{V}_{k_2} & \cdots & \mathbf{V}_{k_m} \end{pmatrix}^T = \mathbf{M}_L^T \mathbf{V}_0 \quad (9)$$

由此得多主宰支路端口诺顿等效电路的导纳矩阵和电流源分别为

$$\mathbf{Y}_{eq} = \mathbf{Z}_{eq}^{-1} = (\mathbf{M}_L^T \mathbf{Z} \mathbf{M}_L)^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_{eq} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{k_1} & \mathbf{I}_{k_2} & \cdots & \mathbf{I}_{k_m} \end{pmatrix}^T = \mathbf{Y}_{eq} \mathbf{V}_{eq} \quad (11)$$

由于关注的是主宰支路潮流安全传输问题,因此需要对主宰支路端口的电压和电流进行解析,设端口节点电流相量和电压相量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{I}_L = (\mathbf{I}_{k_1}, \mathbf{I}_{k_2}, \cdots, \mathbf{I}_{k_m}) \\ \mathbf{V}_L = (\mathbf{V}_{k_1}, \mathbf{V}_{k_2}, \cdots, \mathbf{V}_{k_m}) \end{cases} \quad (12)$$

根据叠加原理,端口节点的电流由网络内部注入电流 $\mathbf{I}_0$ 和外部主宰支路注入电流 $-\mathbf{M}_L \mathbf{I}_L$ 两部分组成,因此可以写出网络节点电压方程为

$$\mathbf{Y}\mathbf{V} = \mathbf{I}_0 - \mathbf{M}_L \mathbf{I}_L \quad (13)$$

将式(13)两边乘以 $\mathbf{M}_L^T \mathbf{Y}^{-1}$,得

$$\mathbf{M}_L^T \mathbf{V} = \mathbf{M}_L^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{I}_0 - \mathbf{M}_L^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{M}_L \mathbf{I}_L \quad (14)$$

由于 $\mathbf{V}_L = \mathbf{M}_L^T \mathbf{V}$, $\mathbf{V}_0 = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{I}_0$, $\mathbf{V}_{eq} = \mathbf{M}_L^T \mathbf{V}_0$,则式(14)可变为

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{V}_{eq} - \mathbf{Z}_{eq} \mathbf{I}_L \quad (15)$$

根据式(10)及 $\mathbf{I}_{eq} = \mathbf{Y}_{eq} \mathbf{V}_{eq}$,得到以多端口主宰支路电流和电压相量为变量的诺顿等效电路方程

$$\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_{eq} - \mathbf{Y}_{eq} \mathbf{V}_L \quad (16)$$

式(16)有 m 个方程,但存在 $\mathbf{V}_L$ 和 $\mathbf{I}_L$ 共 $2m$ 个变量,为了求出所有变量,剩余 m 个方程由外部的主宰支路集给出

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{Z}_{LL} \mathbf{I}_L \quad (17)$$

式中, $\mathbf{Z}_{LL}$ 为主宰支路集的阻抗矩阵。

3. 关键元件集有功载荷能力

得到主宰支路集的电流和电压相量后,需要获取支路上有功载荷能力的极限值以确保传输的有功潮流不过载。设 $\mathbf{V}_L = V_L e^{j\theta_L} = V_L (\cos \theta_L + j \sin \theta_L)$,

$\mathbf{Y}_{eq} = G_{eq} + jB_{eq}$, $\mathbf{I}_{eq} = I_{eq} e^{j\varphi}$,式(14)可以写为

$$P_L - jQ_L = V_L e^{-j\theta_L} [I_{eq} e^{j\varphi} - (G_{eq} + jB_{eq}) V_L e^{j\theta_L}] \quad (18)$$

化简得

$$\begin{cases} P_L = V_L I_{eq} \cos(\theta_L - \varphi) - V_L^2 G_{eq} \\ Q_L = V_L I_{eq} \sin(\theta_L - \varphi) + V_L^2 B_{eq} \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)移项并二次方相加得

$$(P_L + V_L^2 G_{eq})^2 + (Q_L - V_L^2 B_{eq})^2 = (V_L I_{eq})^2 \quad (20)$$

可见,式(20)表示的是关键元件集实际运行的功率圆方程,圆心和半径分别为 $(-V_L^2 G_{eq}, V_L^2 B_{eq})$ 和 $V_L I_{eq}$ 。同时,关键元件集还应满足长期载荷容量限制的约束方程,即

$$P_L^2 + Q_L^2 = S_{L, \max}^2 \quad (21)$$

式中, $S_{L, \max}$ 为主宰支路长期最大载荷容量。

联立式(20)、式(21)可得

$$\begin{cases} \alpha P_L^2 + \beta P_L + \gamma = 0 \\ Q_L = \lambda P_L + \eta \end{cases} \quad (22)$$

其中

$$\begin{cases} \lambda = \frac{V_L^2 G_{eq}}{V_L^2 B_{eq}} \\ \eta = \frac{1}{2V_L^2 B_{eq}} [S_{L, \max}^2 - V_L^2 G_{eq} + V_L^2 B_{eq} - (V_L I_{eq})^2] \\ \alpha = 1 + \lambda^2 \\ \beta = 2\lambda\eta \\ \gamma = \eta^2 - S_{L, \max}^2 \end{cases} \quad (23)$$

解式(22)即可以得到诺顿等效条件下的关键元件集最大有功 $P_{L, \max}$ 和无功 $Q_{L, \max}$ 传输能力,从而可以获得关键元件集有功和无功的运行区间 $[0, P_{L, \max}]$ 、 $[0, Q_{L, \max}]$ 。对其实际运行在区间内位置进行监视,可以简洁、直观地了解系统的运行情况。

实验与仿真

以IEEE 14节点系统为例，对所提的电网简化模型进行检验，系统拓扑如图3所示。

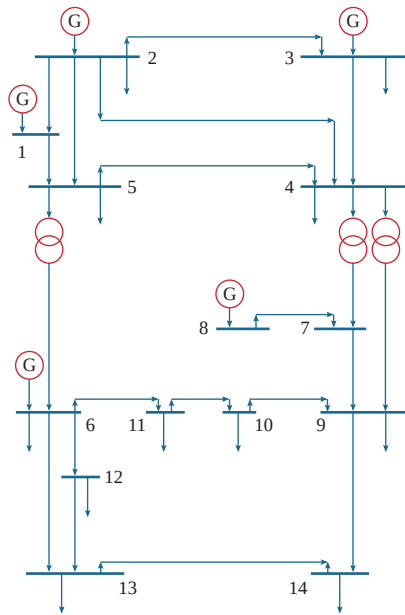


图3 IEEE 14节点系统

1. 非序贯蒙特卡罗运行模式模拟

在 t_i 时间断面内，分别对发电机有功和负载有功做蒙特卡罗10 000次数据模拟，得到发电机和负载的有功数据，并对其进行潮流计算，得到各支路的有功传输数据，如表1所示。

表1 IEEE 14节点支路有功传输数据

支路编号	首节点号	末节点号	传输有功值 (pu)	有功限值 (pu)
1	1	2	38.913 6	342
2	2	3	76.243 4	171
3	2	4	70.869 7	171
4	1	5	39.162 7	171
5	2	5	61.637 3	171
6	3	4	17.715 3	171
7	4	5	43.948 5	171
8	5	6	46.082 9	65
9	4	7	29.854 7	65
10	7	8	3.749 27	50
11	4	9	16.396 2	40
12	7	9	25.856 2	65
13	9	10	4.396 47	50
14	6	11	8.172 17	50

(续)

支路编号	首节点号	末节点号	传输有功值 (pu)	有功限值 (pu)
15	6	12	9.411 22	50
16	6	13	17.281 1	50
17	9	14	8.327 2	50
18	10	11	4.600 92	50
19	12	13	3.304 18	50
20	13	14	6.812 16	50

2. 关键元件集及主宰支路

对表1所示各支路输电元件按式(1)进行负载率计算，得到图4所示的结果。

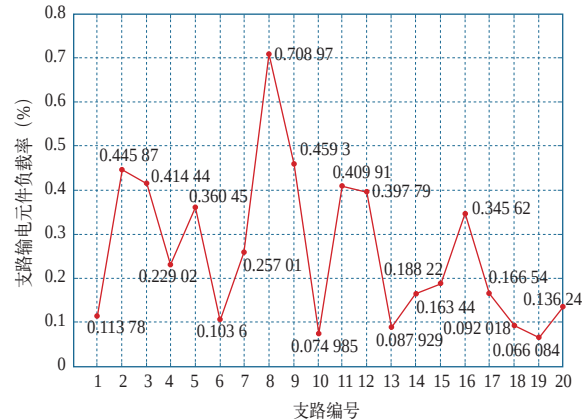


图4 支路输电元件负载率

由图4可以看出支路8（两端节点编号为5和6）具有最大的负载率，是系统的关键输电元件，其输电支路为系统的主宰支路，主宰着系统的安全性。将系统在此支路为端口做诺顿等效，可得到保留关键元件支路和节点的等效网络。

3. 关键元件简化

以支路8为端口做诺顿等效，将其余网络等效至这条支路上，根据上述相关步骤，计算所得数据如表2所示。

表2 诺顿等效数据

参数	数值 (pu)
诺顿等效导纳	0.187 0 - 0.693 0i
诺顿等效电流	0.062 6 - 0.006 3i

将表2诺顿等效参数代入式(16)，得到诺顿等效电路方程，结合外部主宰支路电路方程，可以求出主宰支路上的电流和电压，如表3所示。

将表2、表3的数据代入式(22)中，并设主

宰支路上长期最大载荷容量 $S_{L, \max} = 570 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 得到关键元件的最大有功 $P_{L, \max}$ 和无功 $Q_{L, \max}$ 传输能力, 如表4所示。

表3 主宰支路参数

参数	数值 (pu)
主宰支路电流	$0.044 \text{ 0} - 0.007 \text{ 9i}$
主宰支路电压	$0.004 \text{ 6} + 0.025 \text{ 6i}$

表4 关键元件传输能力数据

参数	数值 (pu)
最大传输有功	411.001 5
最大传输无功	394.940 2

因此, 在此时间断面内, 只要主宰支路的有功输送在 $[0, 411.001 \text{ 5}]$ 区间内, 系统的运行就是安全可靠的。以此类推, 可以得出不同时间断面内主宰支路的有功输送范围, 只要对此进行分析就可以监控整个系统的安全性。

结束语

通过对复杂大电网某一时间断面内运行模式进行模拟, 查找到对整个系统安全起主宰作用的关键输电元件, 并在此端口上做诺顿等效, 可以将系统简化成以关键元件为监视对象的系统, 并对其有功传输潮流进行分析即可确定系统的安全稳定裕度。结果分析表明, 关键输电元件的简化系统可以简化冗余数据的分析, 提高系统安全运行的监控效率, 具有较高的实际意义。

下一步将继续研究分析在同一时间断面内, 不同运行模式下主宰支路的单调性、主宰度及简化后系统的网损变化情况等问题。

参考文献

- [1] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
- [2] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.
- [3] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006,

30(8): 7-10.

- [4] 韩学山, 李晓波. 考虑元件长期载荷容许条件的最大可用输电能力的实用计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 10-15.
- [5] Hamoud G. Assessment of available transfer capability of transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 27-32.
- [6] Yan Ou, Singh C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [7] 刘皓明, 严正, 倪以信, 等. 快速计算电网可用输电能力的交流灵敏度方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 11-15.
- [8] 杨光. 电网可视化技术[J]. 国际电力, 2004, 8(2): 45-47.
- [9] Overbye T J, Weber J D. Visualizing the electric grid[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(2): 52-58.
- [10] 张强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 84-89.
- [11] 常康, 韩学山, 王孟夏, 等. 电网关键元件及其单调性研究I: 概念与基础[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 1-5.
- [12] Billinton R, Li Wenyuan. Reliability assessment of electric power systems using monte carlo methods[M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [13] Billinton R, Jonnavithula A. Application of sequential monte carlo simulation to evaluation of distributions of composite system indices[J]. IEEE Proceedings, Gener, Transm Distrib, 1997, 144(2): 87-90.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

(收稿日期: 2014-05-06) EA