

计及变电站低压侧接线的配电网最大供电能力计算与分析

肖峻¹, 龙梦皓¹, 程敏², 祖国强¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对现有最大供电能力(TSC)模型无法反映变电站低压侧接线形式不同以及主变 $N-1$ 后站内优先转带的问题,提出一种基于 $N-1$ 仿真逼近的计及变电站低压侧接线的配电网TSC算法。根据我国高压配电变电站10 kV侧典型低压侧接线建立配电网算例,研究TSC随低压侧接线形式不同的变化规律以及低压侧接线对TSC的影响机理。仿真结果表明所提方法所得TSC更为精确。

关键词:最大供电能力;配电网;变电站;低压侧接线; $N-1$ 逼近法

中图分类号:TM 715

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.003

0 引言

随着我国城市的不断发展,城市负荷水平仍在增长,然而受到土地、资金等限制,通过新增线路或新增变电站扩充容量的方法愈发困难。因此挖掘现有网络的供电能力成为研究的热点^[1-5]。

配电网最大供电能力TSC(Total Supply Capability)是指一定供电区域满足 $N-1$ 准则条件下,同时计及变电站站内主变与网络转供能力以及实际运行约束的最大负荷供应能力^[2]。影响TSC的主要因素包括主变容量与低压侧接线模式、馈线数量、容量与网络的拓扑结构等^[6-8]。现有文献偏重于研究馈线拓扑结构或容量对TSC的影响^[8-12],但是对主变层面的研究较少。

主变发生 $N-1$ 故障后,负荷会优先通过母联开关转带到同站主变,若过载再通过中压网络转带到其他变电站。因此,变电站的低压侧接线模式将影响主变 $N-1$ 的安全边界,继而影响TSC。现有供电能力模型^[12-16]中均未详细计及低压侧接线拓扑结构,而是简化假设主变退出后,其负荷能够理想地转带到其他同站或不同站的主变,也没有反映站内优先转带的原则。

在配电网的规划建设实践中,高压配电变电站(110 kV、66 kV、35 kV)的低压侧(10 kV)大量采用单母线分段的简单形式,这种形式能否达到一些复杂低压侧接线形式的供电能力,也是非常令人关心的问题。

收稿日期:2017-05-23;修回日期:2017-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900100);国家自然科学基金资助项目(51277129)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900100) and the National Natural Science Foundation of China(51277129)

为此,本文提出一种基于 $N-1$ 仿真的TSC逼近算法,该算法可以详细计及变电站低压侧接线的不同以及站内优先转带,并进一步研究了低压侧接线对TSC的影响大小。

1 计及站内优先转带的TSC仿真逼近算法

1.1 计及站内优先转带的TSC模型

TSC是指在同时满足主变 $N-1$ 和馈线 $N-1$ 校验的情况下,配电网所能提供的最大负荷供应能力。本文在文献[17]模型的基础上进行改进,改进后的模型能够计及主变 $N-1$ 后的站内转带方式,具体模型如式(1)~(7)所示。

$$\max T_{\text{TSC}} = \sum_i P_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } F_m = \sum_n t_{\text{rfmn}} \quad (2)$$

$$P_i = \sum_{m \in T_i, m \notin S_a} F_m + \sum_{n \in T_i, n \in S_a} F_n \quad \forall i \in S_a \quad (3)$$

$$t_{\text{rfmn}} + F_n \leq R_{F_n} \quad (4)$$

$$t_{\text{rfij}} = \sum_{m \in T_i, n \in T_j} t_{\text{rfmn}} \quad \forall m, n \quad (5)$$

$$t_{\text{rfij}} + P_j \leq R_j \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_{m \in T_i, m \notin S_a} F_m = \max \left\{ 0, P_i - \sum_{m \in T_i, n \in S_a} F_n \right\} \quad (7)$$

其中, T_{TSC} 为最大供电能力; P_i 为主变 i 所带负荷; F_m 为馈线 m 的负荷; $n \in S_a$ 表示 n 为连接站内主变的馈线, S_a 表示变电站 a ; t_{rfmn} 为馈线 m 发生 $N-1$ 故障时转带给馈线 n 的负荷量; t_{rfij} 为主变 i 发生 $N-1$ 故障时转带给主变 j 的负荷; T_i 、 T_j 分别表示主变 i 、 j ; $n \in T_i$ 表示馈线 n 出自主变 i 的对应母线; $i \in S_a$ 表示主变 i 在变电站 a 中; R_{F_n} 为第 n 条馈线的容量; R_j 为主变 j 的额定容量。

式(1)~(6)为原有TSC模型中包括的内容,分别为目标函数、馈线分段约束、主变负荷和馈线负荷

关系约束、馈线 $N-1$ 约束、主变负荷转带和馈线负荷转带关系约束以及主变 $N-1$ 约束。

式(7)为TSC模型中体现站内优先转带条件的内容。等号左侧 $\sum_{m \in T_i, m \notin S_a} F_m$ 部分为主变*i*发生*N* - 1故障时站外转带的负荷;等号右侧 $\sum_{m \in T_i, n \in S_a} F_n$ 为站内转带的负荷; $P_i - \sum_{m \in T_i, n \in S_a} F_n$ 为站内转带后剩余的需转带的负荷; $\max\{0, P_i - \sum_{m \in T_i, n \in S_a} F_n\}$ 在站内转带完全时取0,在站内转带后有剩余时取剩余值。该式表明主变*i*发生*N* - 1故障时,负荷*P_i*优先通过站内馈线转带到站内主变中,站内转带后剩余的负荷再转带至站外主变中。若站内转带完全,则不需转带至站外主变。

1.2 基于 $N-1$ 仿真的 TSC 逼近算法

针对上述考虑站内优先转带的 TSC 模型,本文

提出了基于 $N-1$ 仿真的 TSC 逼近算法,流程图如图 1 所示。

第 1 步:准备阶段,电网数据处理,设定工作点。

第2步:循环逼近阶段,可细分为如下2步。

第 2.1 步: 执行馈线 $N-1$ 校验模块^[13-14, 17], 即式 (2) — (4)。

第 2.2 步: 执行主变 $N-1$ 校验模块, 即式 (5) — (7)。结合变电站的低压侧接线方式, 考虑主变 $N-1$ 后站内优先转带的问题。优先将故障负荷转带给同站主变, 若在此接线方式下不能成功转带, 再由中压线路转带到其他变电站。

第3步:输出 TSC,即式(1)。TSC 为所有馈线段负荷之和。本文 TSC 的 $N-1$ 逼近算法同时计及了主变 $N-1$ 和馈线 $N-1$ 安全约束,可以精确描述计及变电站低压侧接线的前提下主变 $N-1$ 后站内优先转带过程,采用 MATLAB 和 C++语言编程实现。

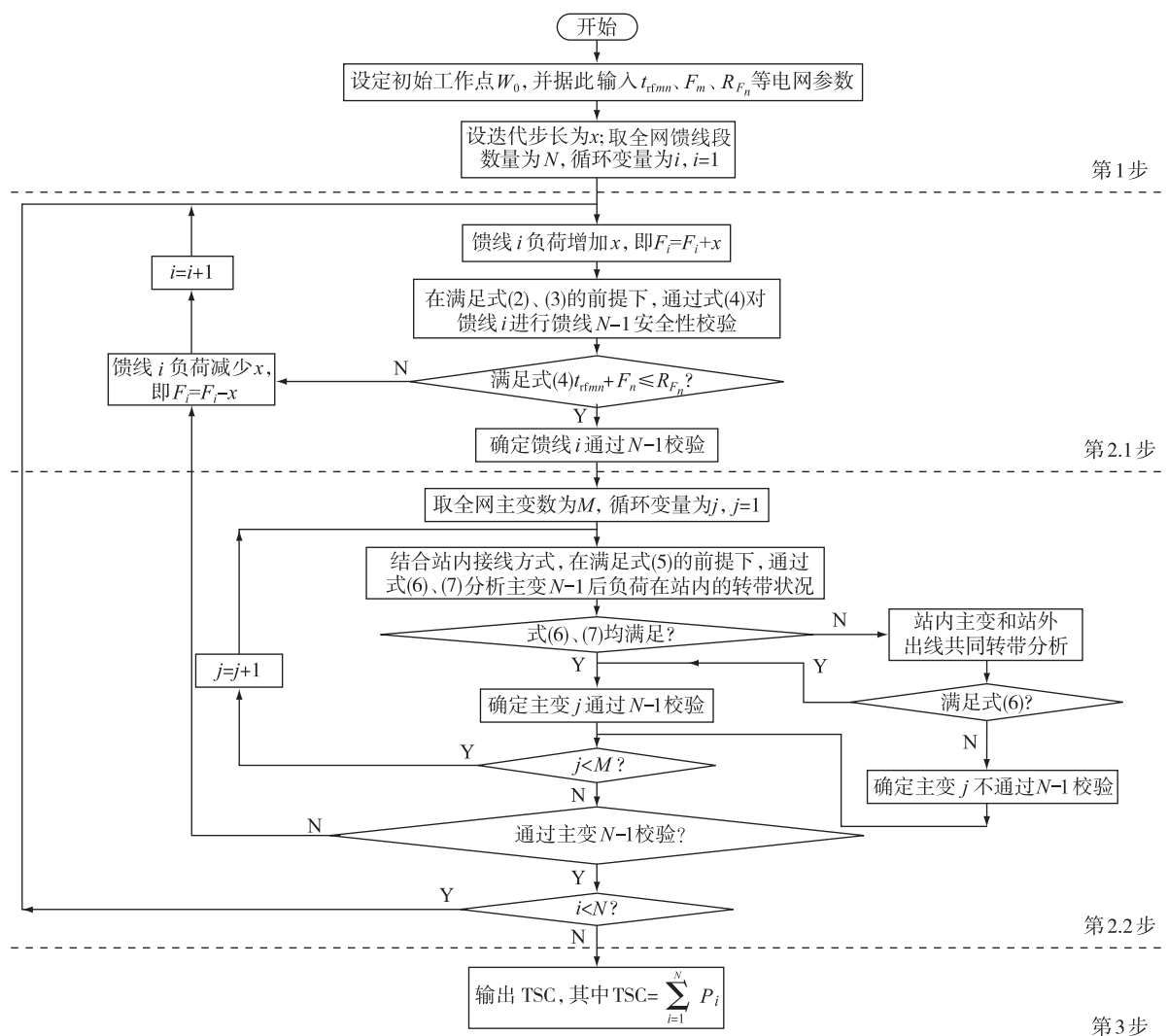


图 1 计及变电站低压侧接线因素的 TSC 逼近算法流程

Fig.1 Flowchart of TSC approximation algorithm considering connection modes at low voltage side of substation

2 常见变电站低压侧接线模式

本文模型只考虑变电站低压侧接线,理由如下:严格地讲,变电站高压侧(110 kV、66 kV、35 kV)、低压侧接线以及高压侧线路,甚至更上一级变电站的接线都与中压配电网的 TSC 与 $N-1$ 安全性是相关的^[2,17],但是若详细计及将极大增加模型的复杂性,在实际电网中有时对数据的要求也很高。高压侧接线以及相连电网的故障将反映到变电站主变是否停电上,因此本文忽略了高压侧接线及上级电网。现有绝大部分的中压配电网安全性分析以及供电能力文献也进行了这一简化。

110 kV 变电站有双主变、三主变和四主变变电站 3 种。双主变变电站的各接线形式在计算 TSC 时没有区别,四主变变电站很少出现,因此本文主要讨论三主变变电站的低压侧接线形式。

三主变变电站低压侧接线形式主要有 3 种:单母线 3 分段接线、单母线 4 分段接线和单母线 6 分段环形接线,分别如图 2—4 所示^[18-22]。

单母线 3 分段接线如图 2 所示,该接线方式通过 2 个母联断路器将母线分为 3 段。 T_1 故障时,闭合母联断路器 QF_{d1} ; T_2 故障时,为保持分列运行方式,只能闭合 QF_{d1} 和 QF_{d2} 其中之一。因此,任一主变发生故障时,其负荷只能由同站的一台非故障变压器进行转带。

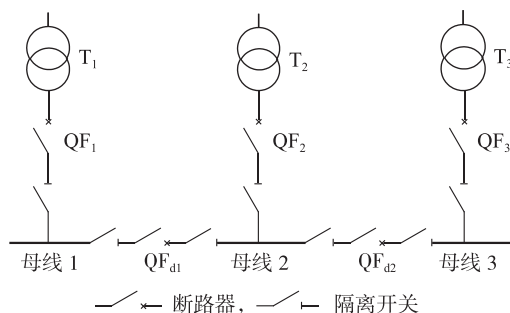


图 2 单母线 3 分段接线

Fig.2 Connection mode of single bus with three segments

单母线 4 分段接线是单母线 3 分段接线的改进,如图 3 所示。该接线方式在单母线 3 分段接线方式的基础上,通过中间主变的进线断路器将中间母线段一分为二。两端主变其中一台故障后,其负荷由中间主变 T_2 转带,而 T_2 故障时的负荷可以通过适当的倒闸操作,由两端非故障变压器分别进行转带。

单母线 6 分段环形接线如图 4 所示,该接线通过 3 个母联断路器和 6 个变压器进线断路器将母线

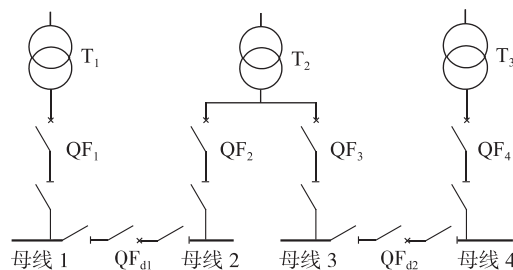


图 3 单母线 4 分段接线

Fig.3 Connection mode of single bus with four segments

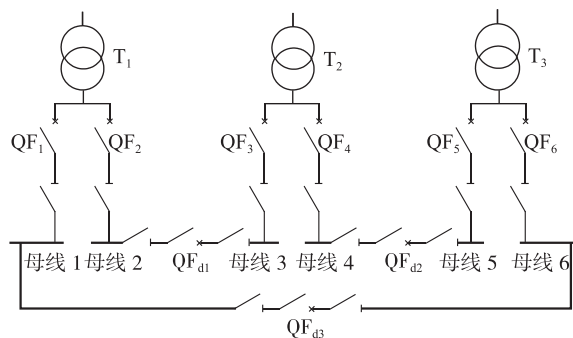


图 4 单母线 6 分段接线

Fig.4 Connection mode of single bus with six segments

分隔为 6 分段。故障时 3 台变压器互为备用,地位相等,通过合理的倒闸操作可使任一故障变压器的负荷由另 2 台非故障变压器转带。

为便于叙述,本文将改变变电站低压侧接线描述为“增加或减少变电站母线分段数”。例如,由单母线 3 分段改为单母线 6 分段,可称为增加变电站母线分段数。

3 变电站低压侧接线对 TSC 的影响

变电站的 10 kV 侧多数为单母线分段接线形式(且每台主变一个分段),采用单母线分段主要目的是简化网络结构。本文将通过更多接线方式的对比,探讨变电站低压侧接线对 TSC 的影响。本文将首先研究改变单座变电站低压侧接线的 TSC 变化情况,再探究全网变电站低压侧接线变化对 TSC 的影响,最后分析改变任意变电站低压侧接线对 TSC 的影响。

3.1 算例概况

为了充分阐述变电站低压侧接线对 TSC 的影响,本文选取了一个均为三主变变电站的区域电网算例,如图 5 所示。图 5 算例共有 3 座 110 kV 变电站、9 台变压器、48 条馈线,单条馈线输送容量为 8.92 MV·A。算例主变总容量为 249 MV·A,馈线总容量为 428.16 MV·A,馈线总容量和变电站总容量的比值为 1.72。

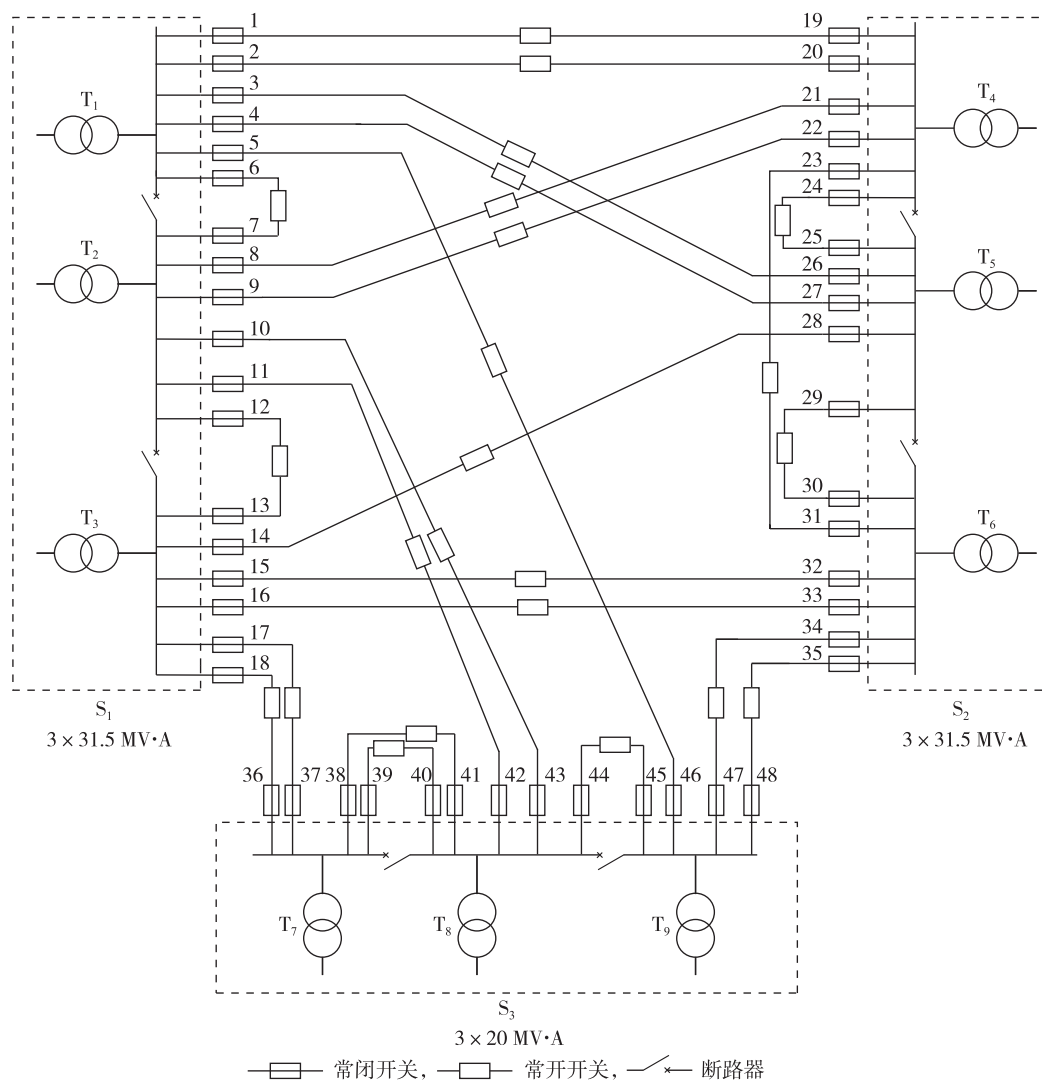


图5 算例配电网

Fig.5 Distribution network case

本文将通过算例演示图1计算TSC的过程,并探究变电站低压侧接线对TSC的影响。本文首先从单座变电站的例子出发,改变单座变电站低压侧接线,探究其对TSC的影响规律和作用机理。然后改变全网变电站低压侧接线,探究其影响。在讨论2种特殊情况后,根据所得结论推及一般情况,展示改变任意变电站低压侧接线对TSC的影响。

3.2 计及变电站低压侧接线的TSC计算

以“ S_1 采用4分段, S_2 、 S_3 采用3分段”的情况展示计及低压侧接线的TSC计算过程,并与“全网采用母线3分段”对比。

3.2.1 计算过程

在“ S_1 采用4分段, S_2 、 S_3 采用3分段”的情况下,执行图1算法流程第1步,准备初始工作点 W_0 。由于主变与所带馈线的容量比一般小于 $2.0^{[13]}$,因此取初始点 W_0 为25%的馈线容量,可以保证馈线

和主变的 $N-1$ 安全性。

执行图1算法流程第2步,进行循环不断增加负荷逼近。经过59次循环后,出现 $N-1$ 校验不通过,停止循环。设最后一次增加馈线负荷而 $N-1$ 校验不通过的工作点为 W_1 。 W_1 时 $N-1$ 校验不通过具体情况如下:馈线 $N-1$ 校验所有馈线均通过,主变 $N-1$ 校验有1台主变(T_9)未通过。

算法流程第2.1步馈线 $N-1$ 校验结果见表1,算法流程第2.2步主变 $N-1$ 校验结果见表2,其中Y表示校验通过,N表示校验不通过。

此时工作点 W_1 的 $N-1$ 负荷转带状况见表3。表中第 i 行第 j 列的数据表示第 i 台主变发生 $N-1$ 故障时向第 j 台主变转供的负荷。

当“ S_1 采用4分段, S_2 、 S_3 采用3分段”的接线方式时,由表3第9行可知当 T_9 发生故障时,转带至 T_6 的负荷为 $9.1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。由表3第6行知 T_6 原有

表 1 工作点 W_1 时的馈线 $N-1$ 校验结果
Table 1 Results of $N-1$ verification for feeders
at operating point W_1

馈线 编号	馈线 $N-1$ 校验结果	馈线 编号	馈线 $N-1$ 校验结果	馈线 编号	馈线 $N-1$ 校验结果
1	Y	17	Y	33	Y
2	Y	18	Y	34	Y
3	Y	19	Y	35	Y
4	Y	20	Y	36	Y
5	Y	21	Y	37	Y
6	Y	22	Y	38	Y
7	Y	23	Y	39	Y
8	Y	24	Y	40	Y
9	Y	25	Y	41	Y
10	Y	26	Y	42	Y
11	Y	27	Y	43	Y
12	Y	28	Y	44	Y
13	Y	29	Y	45	Y
14	Y	30	Y	46	Y
15	Y	31	Y	47	Y
16	Y	32	Y	48	Y

表 2 工作点 W_1 时的主变 $N-1$ 校验结果
Table 2 Results of $N-1$ verification for transformers
at operating point W_1

主变	主变 $N-1$ 校验结果	主变	主变 $N-1$ 校验结果
T_1	Y	T_6	Y
T_2	Y	T_7	Y
T_3	Y	T_8	Y
T_4	Y	T_9	Y
T_5	Y		

表 3 工作点 W_1 时主变 $N-1$ 故障负荷转供表
Table 3 Transferred load under $N-1$ fault of main transformer
at operating point W_1

主变	负荷/($MV \cdot A$)								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
T_1	0	7.8	0	8.0	9.4	0	0	0	0
T_2	4.0	0	7.8	8.0	0	0	0	3.9	0
T_3	0	7.8	0	0	4.0	8.0	3.9	0	0
T_4	3.9	7.8	0	0	7.9	3.9	0	0	0
T_5	4.2	0	4.1	8.0	0	4.1	0	0	0
T_6	0	0	7.6	3.8	11.1	0	0	0	0
T_7	0	0	7.8	0	0	0	0	5.8	0
T_8	0	5.6	0	0	0	0	5.8	0	2.8
T_9	4.0	0	0	0	0	9.1	0	4.2	0

负荷为 $7.6+3.8+11.1=22.5(MV \cdot A)$, 故 T_9 发生 $N-1$ 故障后, T_6 负荷为 $22.5+9.1=31.6(MV \cdot A) > 31.5 MV \cdot A$, $N-1$ 校验不通过。

循环结束后, 执行算法流程第 3 步, 输出最终结果。同理可得到“全网采用母线 3 分段”时的 TSC 与馈线、主变负荷分布。TSC 见表 4; TSC 下的主变

负荷分布见表 5; TSC 下的馈线负荷见表 6 和表 7。

3.2.2 结果验证

一方面, 本文算法能够区分变电站低压侧接线的不同。 S_1 采用 4 分段后 TSC 从 $182.6 MV \cdot A$ 增加到 $184.0 MV \cdot A$, T_1 和馈线 3、4 的可带负荷也增加。

另一方面, 全网变电站采用低压侧 3 分段接线时, 本文方法得到的 TSC、各主变与馈线负荷均与文

表 4 TSC 计算结果

Table 4 Calculation results of TSC

情况	变电站低压侧接线形式	TSC/($MV \cdot A$)
1	S_1, S_2, S_3 采用 3 分段	182.6
2	S_1 采用 4 分段, S_2, S_3 采用 3 分段	184.0
3	S_1 采用 6 分段, S_2, S_3 采用 3 分段	185.9
4	S_2 采用 6 分段, S_1, S_3 采用 3 分段	184.1
5	S_3 采用 6 分段, S_1, S_2 采用 3 分段	183.0

表 5 主变负荷分布情况

Table 5 Load distribution of main transformers

主变	主变所带负荷/($MV \cdot A$)		
	情况 1	情况 2	情况 3
T_1	23.8	25.2	27.1
T_2	23.7	23.7	23.7
T_3	23.7	23.7	23.7
T_4	23.5	23.5	23.5
T_5	20.4	20.4	20.4
T_6	22.5	22.5	22.5
T_7	13.6	13.6	13.6
T_8	14.2	14.2	14.2
T_9	17.2	17.2	17.2

表 6 全网变电站母线 3 分段时各馈线负荷

Table 6 Load of each feeder with all buses
separated into three segments

馈线 编号	馈线负荷/ ($MV \cdot A$)	馈线 编号	馈线负荷/ ($MV \cdot A$)	馈线 编号	馈线负荷/ ($MV \cdot A$)
1	4.0	17	3.9	33	3.8
2	3.8	18	3.9	34	3.8
3	4.0	19	4.0	35	3.5
4	3.9	20	3.9	36	2.9
5	3.9	21	3.9	37	2.9
6	3.9	22	3.9	38	3.9
7	3.9	23	3.9	39	3.9
8	4.0	24	3.9	40	2.9
9	4.0	25	4.2	41	2.9
10	4.0	26	4.0	42	2.8
11	3.8	27	4.0	43	2.8
12	4.0	28	4.1	44	2.8
13	3.9	29	4.1	45	4.1
14	4.0	30	3.8	46	4.1
15	4.0	31	3.8	47	3.6
16	4.0	32	3.8	48	5.4

表7 S_1 母线4分段, S_2 、 S_3 母线3分段时各馈线负荷Table 7 Load of each feeder with buses in S_1 separated into four segments and buses in S_2 and S_3 separated into three segments

馈线 编号	馈线负荷/ (MV·A)	馈线 编号	馈线负荷/ (MV·A)	馈线 编号	馈线负荷/ (MV·A)
1	4.0	17	3.9	33	3.8
2	3.8	18	3.9	34	3.8
3	4.7	19	4.0	35	3.5
4	4.7	20	3.9	36	2.9
5	4.1	21	3.9	37	2.9
6	3.9	22	3.9	38	3.9
7	4.0	23	3.9	39	3.9
8	4.0	24	3.9	40	2.9
9	4.0	25	4.1	41	2.9
10	3.9	26	3.9	42	2.8
11	3.9	27	4.2	43	2.8
12	3.9	28	4.1	44	2.8
13	3.9	29	4.1	45	4.2
14	4.0	30	3.8	46	4.0
15	4.0	31	3.8	47	3.6
16	4.0	32	3.8	48	5.4

献[17]中不计及变电站低压侧接线的现有算法所得结果相同,说明本文算法很好地兼容了现有算法。

3.3 改变单座变电站低压侧接线对 TSC 的影响

3.3.1 改变单座变电站低压侧接线对 TSC 的影响

如图2所示,改变低压侧接线形式后,变电站站外联络关系不变,站内主变联络关系改变。

假设初始情况下算例全部变电站采用3分段接线。在第3.2节的基础上,分别增加变电站 S_1 、 S_2 、 S_3 的母线分段数,TSC 计算结果如表4所示。

由表4可知,增加单座变电站母线分段数会使 TSC 增大;同时由表4的第1—3行可知,单座变电站的母线分段数越多,TSC 越大。

3.3.2 改变单座变电站低压侧接线对 TSC 的影响分析

以表4中前3种接线形式为例,分析 TSC 随母线分段数增多而增大原因。采用类似第3.2节的方法可得到变电站 S_1 采用6分段接线,变电站 S_2 、 S_3 采用3分段接线时的主变 TSC 负荷分布。3种状态下的主变分布汇总见表5。

由表5可知,增加变电站 S_1 母线分段数后,只有主变 T_1 所带负荷增大,其他主变的负荷不变,主变 T_1 增加的负荷即为增加的 TSC。下面分析 TSC 条件下 T_1 负荷增加的原因。

表8—10列出了3种接线情况的负荷转供情况。

当全网变电站低压侧采用3分段接线形式时,由表8第一行可知 T_1 所带负荷为 $7.8+7.8+8.2=23.8(\text{MV}\cdot\text{A})$ 。由于负荷优先进行站内转带,结合

图2可知主变 T_2 故障时负荷首先经由母线1转带到同站的主变 T_1 ,而该接线方式下无法通过母线3转带至主变 T_3 。由表8第2行可知主变 T_2 发生故障时转带给 T_1 的负荷为 $7.7 \text{ MV}\cdot\text{A}$,此时主变 T_1 恰好处于 $N-1$ 约束条件边界。若主变 T_1 多带一点负荷,假设增至 $23.9 \text{ MV}\cdot\text{A}$,则变压器 T_2 故障时变压器 T_1 所带总负荷为 $23.9+7.7=31.6(\text{MV}\cdot\text{A})$,主变 T_1 将过载而无法满足主变 $N-1$ 条件。由此可知全网3分段接线形式下,主变 T_2 故障时的 $N-1$ 约束限制了主变 T_1 所带负荷。

表8 全网3分段主变 $N-1$ 故障负荷转供表Table 8 Transferred load under $N-1$ fault of main transformer with all buses separated into three segments

主变	负荷/(MV·A)								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
T_1	0	7.8	0	7.8	8.2	0	0	0	0
T_2	7.7	0	4.0	8.0	0	0	0	4.0	0
T_3	0	7.8	0	0	4.0	8.0	3.9	0	0
T_4	3.9	7.8	0	0	7.9	3.9	0	0	0
T_5	4.2	0	4.1	8.0	0	4.1	0	0	0
T_6	0	0	7.6	3.8	11.1	0	0	0	0
T_7	0	0	7.8	0	0	0	0	5.8	0
T_8	0	5.6	0	0	0	0	5.8	0	2.8
T_9	4.1	0	0	0	0	9.0	0	4.1	0

当变电站 S_1 采用4分段接线,变电站 S_2 、 S_3 采用3分段接线时,由表9第1行可知主变 T_1 所带负荷增为 $7.8+8.0+9.4=25.2(\text{MV}\cdot\text{A})$ 。结合图3可知该接线形式下主变 T_2 故障时负荷不但可以通过母线1、2优先转带给同站的主变 T_1 ,也可以通过母线3、4转带给同站的主变 T_3 ,因此转带给主变 T_1 的负荷变少。由表9第2行可知,主变 T_2 故障时转带给 T_1 的负荷减为 $4 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。此时主变 T_1 不再受主变 T_2 发生 $N-1$ 故障时的约束,而受其他约束,因此主变 T_1 负荷可以增大。

表9 S_1 采用4分段, S_2 、 S_3 采用3分段时部分主变 $N-1$ 故障负荷转供表Table 9 Partial transferred load under $N-1$ fault of main transformer with buses in S_1 separated into four segments and buses in S_2 and S_3 into three segments

主变	负荷/(MV·A)								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
T_1	0	7.8	0	8.0	9.4	0	0	0	0
T_2	4.0	0	7.8	8.0	0	0	0	3.9	0
T_3	0	7.8	0	0	4.0	8.0	3.9	0	0
T_4	3.9	7.8	0	0	7.9	3.9	0	0	0
T_5	4.2	0	4.1	8.0	0	4.1	0	0	0
T_6	0	0	7.6	3.8	11.1	0	0	0	0
T_7	0	0	7.8	0	0	0	0	5.8	0
T_8	0	5.6	0	0	0	0	5.8	0	2.8
T_9	4.0	0	0	0	0	9.0	0	4.2	0

当变电站 S_1 采用 6 分段, S_2 、 S_3 采用 3 分段接线的情况时, 主变 T_1 所带负荷较 S_1 采用 4 分段时又有所增加。结合图 4 可知这是因为该接线情况下, 主变 T_1 故障时分别通过母线 2、3 和母线 4、5 向同站主变 T_2 、 T_3 进行负荷转带, 因此转带给其他主变的负荷减少。由表 10 第 1 行知, 该接线情况下主变 T_1 发生故障时可向站内主变 T_3 转带 $7.8 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的负荷, 转带给 T_2 、 T_4 的负荷分别减为 $4.9 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。因此虽然主变 T_1 所带负荷增加, 主变 T_2 、 T_4 在 T_1 故障时仍可满足 $N-1$ 约束, 从而使得 T_1 可带负荷增加。增加变电站 S_2 或 S_3 的低压侧母线分段数时 TSC 增大的原因也与上述分析相同。

表 10 S_1 采用 6 分段, S_2 、 S_3 采用 3 分段时主变 $N-1$ 故障负荷转供表

Table 10 Transferred load under $N-1$ fault of main transformer with buses in S_1 separated into six segments and buses in S_2 and S_3 into three segments

主变	负荷/($\text{MV} \cdot \text{A}$)								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
T_1	0	4.9	7.8	5.0	9.4	0	0	0	0
T_2	4.0	0	7.8	8.0	0	0	0	3.9	0
T_3	3.9	4.0	0	0	4.0	7.9	3.9	0	0
T_4	3.9	7.8	0	0	7.9	3.9	0	0	0
T_5	4.2	0	4.1	8.0	0	4.1	0	0	0
T_6	0	0	7.6	3.8	11.1	0	0	0	0
T_7	0	0	7.8	0	0	0	0	5.8	0
T_8	0	5.6	0	0	0	0	5.8	0	2.8
T_9	4.0	0	0	0	0	9.0	0	4.2	0

由上述分析可知, TSC 增大的原因为单座变电站采用母线分段数更多的接线方式后, 该站内的主变发生 $N-1$ 故障时可以通过站内优先转带, 利用同站内原来并未利用到的主变备用容量, 从而减轻其他主变的负荷转带负担, 使得 $N-1$ 约束条件放宽, 主变可带的负荷增大, 从而使 TSC 增大。并且分段数越多, 同站主变备用容量的利用就越充分, 需要向其他主变转带的负荷就越少, 因此 TSC 增大越多。

3.4 改变全网变电站低压侧接线对 TSC 的影响

3.4.1 改变全网变电站低压侧接线对 TSC 的影响

仍以图 5 为例, 探究全网变电站低压侧接线形式对 TSC 的影响。算例中全网变电站分别采用 3 分段接线、4 分段接线、6 分段接线时, TSC 计算结果如表 11 所示。

表 11 TSC 计算结果

Table 11 Calculation results of TSC

情况	变电站低压侧接线形式	TSC/($\text{MV} \cdot \text{A}$)
a	全网采用 3 分段	182.6
b	全网采用 4 分段	184.3
c	全网采用 6 分段	187.0

由表 11 可知, 增加全网变电站低压侧母线分段数会使 TSC 增大, 并且母线分段数随之越多, TSC 越大。所得结论与增加单座变电站低压侧母线分段数的结论类似。

3.4.2 改变全网变电站低压侧接线对 TSC 的影响

类似第 3.3.2 节, 可对表 11 中的 3 种接线方式进行分析。表 12 显示了 3 种接线情况的主变 TSC 负荷分布。表 13 和表 14 则显示了 $N-1$ 后的负荷转带状况。

表 12 主变负荷分布情况

Table 12 Load distribution of main transformers

主变	主变所带负荷/($\text{MV} \cdot \text{A}$)		
	情况 a	情况 b	情况 c
T_1	23.8	25.5	25.8
T_2	23.7	23.7	23.7
T_3	23.7	23.7	23.7
T_4	23.5	23.5	23.5
T_5	20.4	20.4	22.2
T_6	22.5	22.5	23.1
T_7	13.6	13.6	13.6
T_8	14.2	14.2	14.2
T_9	17.2	17.2	17.2

表 13 全网 4 分段主变 $N-1$ 故障负荷转供表

Table 13 Transferred load under $N-1$ fault of main transformer with all buses separated into four segments

主变	负荷/($\text{MV} \cdot \text{A}$)								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
T_1	0	7.8	0	8.0	9.7	0	0	0	0
T_2	3.9	0	7.8	8.0	0	0	0	4.0	0
T_3	0	7.8	0	0	4.0	8.0	3.9	0	0
T_4	3.9	7.8	0	0	7.9	3.9	0	0	0
T_5	4.0	0	4.1	4.2	0	8.1	0	0	0
T_6	0	0	7.6	3.8	11.1	0	0	0	0
T_7	0	0	7.8	0	0	0	0	5.8	0
T_8	0	5.6	0	0	0	0	5.8	0	2.8
T_9	4.1	0	0	0	0	9	0	4.1	0

表 14 全网 6 分段主变 $N-1$ 故障负荷转供表

Table 14 Transferred load under $N-1$ fault of main transformer with all buses separated into six segments

主变	负荷/($\text{MV} \cdot \text{A}$)								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
T_1	0	5.0	3.9	8.0	8.9	0	0	0	0
T_2	3.9	0	7.8	8.0	0	0	0	4.0	0
T_3	3.9	7.8	0	0	4.0	8.0	0	0	0
T_4	0	7.8	0	0	7.9	7.8	0	0	0
T_5	4.4	0	4.5	4.9	0	8.4	0	0	0
T_6	0	0	7.8	7.8	7.5	0	0	0	0
T_7	0	0	7.8	0	0	0	0	5.8	0
T_8	0	5.6	0	0	0	0	5.8	0	2.8
T_9	4.1	0	0	0	0	5.4	3.6	4.1	0

当全网主变低压侧采用 4 分段形式接线时, 主变 T_1 所带负荷增为 $25.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 其他主变所带负荷不变, TSC 增为 $184.3 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。与单座变电站 TSC 增加原因类似, 主变 T_1 负荷增加是因为该接线形式下

主变 T_2 故障时,由于站内负荷优先转带,同站主变 T_1 、 T_3 经由母线 2 和母线 3 都可以进行负荷转带,因此转带给主变 T_1 的负荷变少,使 T_1 可带的负荷增加,全网 TSC 增加。当全网主变低压侧采用 6 分段形式接线时,主变 T_1 、 T_5 、 T_6 所带负荷增加,其他主变所带负荷不变,TSC 较全网采用 4 分段接线时增至 $187 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。以主变 T_6 的负荷为例,当全网采用 4 分段接线形式时,主变 T_6 所带负荷为 $22.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$,由表 13 知,主变 T_6 故障时需向主变 T_6 转供 $9 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的负荷,负荷转带后主变 T_6 恰好满足主变 $N-1$ 约束, T_6 故障时的 $N-1$ 约束条件限制了 T_6 所带负荷的增加。但当全网采用 6 分段接线形式时,由表 14 可知,主变 T_6 发生故障时优先进行负荷站内转带,其大部分负荷由同站的非故障变压器转带,因此转带给站外主变 T_6 的负荷降为 $5.4 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。由表 14 可知,此时主变 T_6 不再受主变 T_6 故障时的 $N-1$ 约束,而受主变 T_5 故障时的负荷转供约束, T_5 转供给 T_6 的负荷为 $8.4 \text{ MV} \cdot \text{A}$,因此主变 T_6 可带负荷变大为 $23.1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。同理主变 T_1 所带负荷增大是因为同站主变 T_2 故障时可以通过站内优先转带,转带一部分负荷给站内的 T_3 ,使得转带给 T_1 的负荷减少了;主变 T_5 所带负荷增大是因为同站主变 T_6 故障时可以通过站内优先转带,转带一部分负荷给同站的 T_4 ,使得转带给 T_5 的负荷减少了。

由上述分析可知,增加全网变电站分段数对 TSC 的作用机理与增加单座变电站分段数类似,都是因为变电站站内母线的分段数增多后,站内主变故障时通过站内优先转带所利用到的同站备用容量增多,需要向其他主变转带的负荷减少,使得其他主变可带的负荷增大,从而使 TSC 增大。并且分段数越多,同站主变备用容量的利用就越充分,需要向其他主变转带的负荷就越少,因此 TSC 增大越多。

3.5 改变任意变电站低压侧接线对 TSC 的影响

增大任意变电站低压侧母线分段数,其 TSC 计算结果如表 15 所示。

表 15 TSC 计算结果

Table 15 Calculation results of TSC

变电站低压侧接线形式	TSC/($\text{MV} \cdot \text{A}$)
全网采用 3 分段	182.6
S_1 为 6 分段, S_2 、 S_3 为 3 分段	185.9
S_1 、 S_2 为 6 分段, S_3 为 3 分段	186.8
全网 6 分段接线	187.0

由表 15 可知,增加变电站低压侧母线分段数会使 TSC 增大。该结果与第 3.3 节与 3.4 节的分析吻合。

产生此现象的原因有 2 点:采用母线分段数更多的接线方式后,站内主变发生 $N-1$ 故障时可以通过站内优先转带,利用同站内原来并未利用到的主变备用容量,从而减轻了其他主变的负荷转带负担,使得 $N-1$ 约束条件放宽,其他主变可带的负荷增大,从而使 TSC 增大;变电站的分段数或增加分段数的变电站越多,同站主变备用容量的利用就越充分,需要向其他主变转带的负荷就越少,TSC 增大越多。

需要指出,相比其他影响 TSC 的因素,变电站低压侧接线对 TSC 影响较小。在实际中普遍采用的单母线接线是合适的,因为采用更复杂接线带来的 TSC 增加有限。

4 结论

本文提出了一种计及变电站低压侧接线的配电网 TSC 计算方法,能区别不同低压侧接线对 TSC 的影响,还能更精确地反映主变 $N-1$ 的站内转带过程。

基于该方法分析了不同低压侧接线形式对 TSC 的影响,主要结论如下:

a. 增加变电站低压侧母线分段数将提升 TSC,原因是优先考虑站内转带,不仅充分利用了同站主变备用容量,而且减少了向站外主变转带负荷,从而使站内其他主变可带负荷增大,这两方面因素导致 TSC 增大;

b. 低压侧接线复杂后带来 TSC 增加很小,因此建议规划中采用单母线 3 分段接线的简单接线方式即可。

参考文献:

- [1] LUO Fengzhang, WANG Chengshan, XIAO Jun, et al. Rapid evaluation method for power supply capability of urban distribution system based on $N-1$ contingency analysis of main-transformers[J]. Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(10): 1063-1068.
- [2] 肖峻,谷文卓,郭晓丹,等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. A new model for supply capability in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [3] 袁博,邵华,贺春光,等. 智能配电系统规划关键问题与研究展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 65-73.
YUAN Bo, SHAO Hua, HE Chunguang, et al. Key issues and research prospects of smart distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 65-73.
- [4] 卢志刚,陈伟坤,张晓辉,等. 城市电网输配全局最大供电能力分析[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1623-1630.

- LU Zhigang, CHEN Weikun, ZHANG Xiaohui, et al. Global maximum power supply capability analysis of city power grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1623-1630.
- [5] 张晓雪, 牛焕娜, 赵静翔, 等. 考虑微电网供电潜力的配电网孤岛划分[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 51-58.
- ZHANG Xiaoxue, NIU Huanna, ZHAO Jingxiang, et al. Distribution network island partition considering potential power-supply of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 51-58.
- [6] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 计及主变过载和联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 97-103.
- GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 97-103.
- [7] 肖峻, 郭晓丹, 王成山, 等. 基于供电能力的配电网联络有效性评价与化简方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 31-37.
- XIAO Jun, GUO Xiaodan, WANG Chengshan, et al. A TSC-based evaluation and simplification method on tie-lines of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 31-37.
- [8] 韩俊, 刘洪, 葛少云, 等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 42-47.
- HAN Jun, LIU Hong, GE Shaoyun, et al. Optimization modeling for contact structure of main transformers between substations with improved power supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 42-47.
- [9] 肖峻, 祖国强, 贺琪博, 等. 馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 38-44.
- XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 38-44.
- [10] 张嘉堃, 韦钢, 朱兰, 等. 基于盲数模型的含分布式电源配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 64-70.
- ZHANG Jiakun, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Blind-number model based power supply capability evaluation of distribution networks with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 64-70.
- [11] 陈璐, 陈连杰, 欧阳文, 等. 基于环形结构的配电网联络图布局算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 151-156.
- CHEN Lu, CHEN Lianjie, OUYANG Wen, et al. Ring structure based layout algorithm for distribution network contact-graph[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 151-156.
- [12] 肖峻, 祖国强, 李晓辉, 等. 基于最大供电能力的配电网馈线联络建设次序规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 49-55.
- XIAO Jun, ZU Guoqiang, LI Xiaohui, et al. A TSC-based planning method on construction order of feeder links for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 49-55.
- [13] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 城市中压配电网最大供电能力评估方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 403-407.
- OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Evaluation method for maximum load capability of urban medium-voltage distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 403-407.
- [14] 刘健, 殷强, 张志华. 配电网分层供电能力评估与分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 44-49.
- LIU Jian, YIN Qiang, ZHANG Zhihua. Evaluation and analysis of hierarchical total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 44-49.
- [15] 荆朝霞, 江昌旭, 王宏益. 考虑 $N-1$ 安全约束的220 kV片区电网最大供电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 145-152.
- JING Zhaoxia, JIANG Changxu, WANG Hongyi. Total supply capability calculation of 220 kV area power grid considering $N-1$ security constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 145-152.
- [16] CHEN Kening, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A method to evaluate total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2096-2104.
- [17] 肖峻, 谷文卓, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 72-77.
- XIAO Jun, GU Wenzhuo, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [18] 黄伟, 刘琦, 杨舒文, 等. 基于主动配电系统供电能力的安全态势感知方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 74-80.
- HUANG Wei, LIU Qi, YANG Shuwen, et al. Security situation awareness based on power-supply ability model of active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 74-80.
- [19] 肖峻, 蒋迅, 郭伟, 等. 分区柔性互联城市电网的最大供电能力分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 66-73.
- XIAO Jun, JIANG Xun, GUO Wei, et al. Total power supply capability of urban power grid with flexibly interconnected partitions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 66-73.
- [20] 肖峻. 城市电网规划计算机辅助决策新技术的研究与实现[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- XIAO Jun. A study and implementation on new technologies of computer decision-making support for urban power system planning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [21] 黄华生. 3条进线3台变压器的110 kV变电站主接线方式选择[J]. 供用电, 2012, 29(5): 42-45.
- HUANG Huasheng. Selection of main connection methods for 110 kV substation with three incoming lines and three transformers[J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(5): 42-45.
- [22] 程一鸣, 赵志辉, 王天华. 城市110 kV高压配电网接线方式研究[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊2): 113-115.
- CHENG Yiming, ZHAO Zhihui, WANG Tianhua. Research on connection mode of civil 110 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(Supplement 2): 113-115.

search of cloud model [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 420-426.

[46] 杨莉. 基于可能性理论的发电公司报价策略研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.

YANG Li. Generation companies bidding strategy based on possibility theory research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[47] 马永杰. 电网故障模型中贝叶斯网络和 DS 证据理论的应用 [J]. 企业技术开发, 2011, 30(3): 20-21.

MA Yongjie. Power grid failure model of the application of bayesian network and DS evidence theory [J]. Technology Development, 2011, 30(3): 20-21.

[48] 林治, 张璇. 粗糙集理论的应用探析 [J]. 邢台职业技术学院学报, 2011, 28(3): 61-63.

LI Ye, ZHANG Xun. Analysis of the application of rough set theory [J]. Journal of Xingtai Vocational and Technical College, 2011, 28(3): 61-63.

作者简介:



杨 茂

杨 茂 (1982—), 男, 吉林吉林人, 副教授, 博士, 研究方向为新能源并网及电力系统稳定性分析等 (E-mail: yangmao820@163.com);

杨琼琼 (1992—), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为风电功率预测 (E-mail: 1025093444@qq.com)。

Review of modeling of wind speed-power characteristic curve for wind turbine

YANG Mao, YANG Qiongqiong

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

Abstract: The wind speed-power characteristic curve is the basis for the design of wind turbine, and it is also an important indicator for assessing the unit performance and generation ability. The definition, concept and basic features of wind speed-power characteristic curve are introduced, and the modeling methods for the curve are elaborated from four aspects, i. e. parameter method, nonparametric method, discrete method, and random method. The evaluation method for modeling accuracy is analyzed and also the problems currently faced during modeling and the development directions needed to be deeply researched are proposed.

Key words: wind speed-power characteristic curve; parameter method; nonparametric method; discrete method; random method; model building

(上接第 26 页 continued from page 26)

作者简介:



肖 峻

肖 峻 (1971—), 男, 四川成都人, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为城市电网规划、评估与微网规划 (E-mail: xiaojun@tju.edu.cn);

龙梦皓 (1992—), 男, 天津人, 硕士研究生, 主要研究方向为电网安全域、智能电

网 (E-mail: longmenghao@sina.com);

程 敏 (1992—), 男, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复、电力市场 (E-mail: zju_mincheng@163.com);

祖国强 (1989—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 研究方向为智能配电系统规划与运行 (E-mail: zuguoqiang_tju@163.com)。

Calculation and analysis of total supply capability of distribution network considering connection mode at low voltage side of substation

XIAO Jun¹, LONG Menghao¹, CHENG Min², ZU Guoqiang¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems of the existing TSC (Total Supply Capacity) model which can not reflect different connection modes at the low voltage side of substation and the priority transfer of main transformer after $N-1$, a TSC algorithm for distribution network is proposed based on $N-1$ simulation approximation, which considers the connection mode at the low voltage side of substation. A distribution network case is built according to the typical connection modes at the 10 kV low voltage side of high voltage distribution substation, the variation rule of TSC along with different connection modes at the low voltage side and the influence mechanism of the connection modes on TSC are researched. Simulative results verify that the TSC obtained by the proposed method is of higher accuracy.

Key words: total supply capability; distribution network; electric substations; connection mode at low voltage side; $N-1$ approximation algorithm