

# 考虑负荷变化的配电网动态优化

刘健<sup>1,2</sup>, 徐精求<sup>1</sup>, 董海鹏<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电气学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西银河电力自动化股份有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 为了减少一段时期内配电网运行方式的切换次数, 提出一种考虑负荷变化的配电网动态优化方法, 该方法将考察时期分成一系列时间段, 根据各个时间段的负荷预测结果, 以线损最低为目标函数, 分别得出各个时间段的最佳运行方式, 并将具有相同运行方式的相邻时间段加以合并, 在此基础上, 定义了方式切换最小收益阈值, 只有运行方式调整后的收益超过该阈值的方式切换才被允许, 从而避免了切换收益小或刚切换不久又要进行方式调整的不必要的方式切换, 并得出了恰当的方式切换时机。还讨论了在量测数据缺乏的情况下, 线损和电压降落的简化计算方法。最后给出一个实例, 表明了提出方法的可行性。

**关键词:** 配电网; 网络重构; 优化; 配电自动化

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)13-0015-05

## 0 引言

随着城乡电网的建设和改造的顺利进行, 各地形成了多供电途径的、具有灵活互带能力的网格状配电网, 在此基础上利用人工智能寻求最优运行方式并实现网络重构, 对于提高供电可靠性、扩大供电能力、降低线路损耗具有重要意义。

针对配电网网络重构已经有大量文献发表, 主要研究成果包括: 采用遗传算法<sup>[1]</sup>或模拟退火算法<sup>[2]</sup>等进化算法进行优化; 采用支路交换法<sup>[3]</sup>或最优流法<sup>[4]</sup>等启发式算法进行优化; 在我国配电线路分段少、馈线间的负荷转移必须成组进行的情形下, 还可采用健壮性更好的负荷均衡化方法<sup>[5]</sup>进行优化。

上述研究成果对于配电网经济运行具有较大的指导意义, 但是仍存在一个不足, 就是优化所依据的数据仅来源于某一个时间断面的负荷数据。而实际上负荷是变化的, 比如一天中的负荷变化就非常明显并且有规律。如果仅根据当前时刻的负荷情况进行网络运行方式调整, 可能刚调整完不久该方式就会因为负荷的变化而需要再次调整, 导致一段时期内过于频繁地改变运行方式, 不仅增大了操作成本和操作风险, 而且对用户正常用电也会造成影响。

本文提出一种考虑负荷变化趋势的配电网网络优化方法, 可以得出在未来一段时间内都适合的少数几种优化运行方式, 避免了切换收益小或刚切换不久又要进行方式调整的不必要的方式切换, 减少了开关操作次数。

## 1 基本原理

配电网过程优化是依据负荷预测结果, 寻求在未来一段时间内能够以较少的开关操作次数和个数达到较大收益的各种运行方式以及方式切换的时机。

采用文献[5]提出的方法对配电网进行建模, 即将配电开关看作是节点, 而将配电开关围成的线路和配电变压器综合看作区域, 采用复数功率反映负荷, 显然节点  $m$  的负荷  $S_m$  等于其所有子节点的负荷之和加上它们围成的区域的负荷  $S(m, \cdot)$ , 即

$$S_m = P_m + j \sum_{n \in \Omega_m} S_n + S(m, \cdot) \quad (1)$$

其中:  $\Omega_m$  是节点  $m$  的所有子节点的集合。

反过来, 区域的负荷  $S(m, \cdot)$  等于它的入点  $m$  的负荷  $S_m$  减去它的所有出点的负荷, 即

$$S(m, \cdot) = S_m - \sum_{i \in \Gamma_m} S_i \quad (2)$$

其中:  $\Gamma_m$  为配电区域的出点的集合。

配电网过程优化可以采用下列步骤:

**第一步:** 配电区域负荷预测。对于一个配电自动化系统, 在正常情况下, 配电开关处的负荷可从数据采集装置中获得, 然后根据式(2)可以得到各个区域的负荷, 利用这些数据可以采用文献[6]的方法预测出各个区域未来的负荷情况。

**第二步:** 以一定的时间间隔  $T$ , 根据进行相应时间断面的负荷预测数据  $f(n-T)$  进行短期网络优化, 其中  $n$  为非负整数,  $T$  的取法依负荷预测数据的时间间隔而定, 比如: 半小时、一小时等。短期网络优化以负荷均衡化或减少线路损耗为目标, 这

样得到一系列优化结果(即最优的运行方式安排时间表),如图 1(a)所示。图中 A、B、C、D 和 E 代表运行方式。

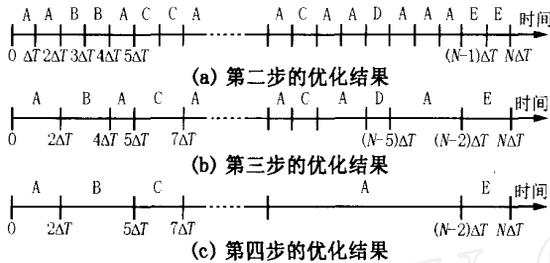


图 1 各个时间断面的网络优化结果

Fig. 1 Results of network optimization at each instance

第三步:在第二步优化结果中,若相邻时间段有相同的方式,则将它们合并,如图 1(b)所示。

第四步:在第三步优化结果中,相邻时间段一定具有不同的方式,比如 $[0, 2 T]$ 段方式 A 较好,而 $[2 T, 4 T]$ 段方式 B 较好。在本步当中,要判断究竟有没有必要全部进行这些方式切换。为此首先要定义相邻的两个时间段分别表示为  $K$  和  $K+1$ , 并设第一个时间段的序号为 1、最后一个时间段的序号为  $M$ 。接下来计算评价函数:  $g(X_K, X_K)$  和  $g(X_K, X_{K+1})$ , 它们分别代表在  $K$  和  $K+1$  时间段始终采用  $X_K$  方式和在交界处从  $X_K$  方式切换到  $X_{K+1}$  方式的损益情况,即

$$g(X_K, X_{K+1}) = \int_0^K A_{X_K} [f(t)] dt + \int_K^{K+1} A_{X_{K+1}} [f(t)] dt + \sum_{j=K}^K A_{X_K} [f(j T)] T + \sum_{i=K+1}^{K+1} A_{X_{K+1}} [f(i T)] T \quad (3)$$

其中:  $A_{X_K} [f]$  和  $A_{X_{K+1}} [f]$  分别为方式  $X_K$  和  $X_{K+1}$  的指标计算函数,一般可以采用有功损耗电量等;  $f(t)$  为负荷预测结果。

$$g(X_K, X_K) = \int_0^K A_{X_K} [f(t)] dt + \int_K^{K+1} A_{X_K} [f(t)] dt + \sum_{j=K}^K A_{X_K} [f(j T)] T + \sum_{i=K+1}^{K+1} A_{X_K} [f(i T)] T \quad (4)$$

我们定义  $W_s$  为方式切换最小收益阈值,只有当方式切换后的最小收益值超过  $W_s$  时才考虑进行运行方式的切换。 $W_s$  为综合考虑了开关的操作成本、操作风险和期望的方式切换最小收益等因素,  $W_s$  取的越大,往往运行方式切换机会越少,反之  $W_s$  取的越小,往往运行方式切换机会越多。

对于具有不同运行方式的相邻两个时间段  $K$  和  $K+1$ , 当有如下情况:

情况 1:  $g(X_K, X_K) - g(X_K, X_{K+1}) < W_s$  (5 - a) 此时,意味着进行方式切换的必要性不大,则可将

$K$  和  $K+1$  两个时段合并,并采用  $X_K$  方式。

情况 2:  $g(X_K, X_K) - g(X_K, X_{K+1}) > W_s$  (5 - b) 此时,可在  $K$  时段采用  $X_K$  方式,在  $K+1$  时段采用  $X_{K+1}$  方式。

当进行了上述两种情况处理后如果相邻时间段的运行方式相同,则将它们合并成为一个时间段,再重复进行下一轮两两时间段的评价函数的计算并进行相应的优化,优化规则同上所述。

下面,以图 1(b)的情形为例说明上述过程。假设对于  $(0, 2 T)$  和  $(2 T, 4 T)$  两个时段,符合情况 2,即确定在  $(0, 2 T)$  时段为 A 方式,在  $(2 T, 4 T)$  时段为 B 方式;假设对于  $(2 T, 4 T)$  和  $(4 T, 5 T)$  两个时段,符合情况 1,即确定  $(2 T, 4 T)$  和  $(4 T, 5 T)$  合并为一个时段  $(2 T, 5 T)$ , 运行方式为 B;假设对于  $(2 T, 5 T)$  和  $(5 T, 7 T)$  两个时段,符合情况 2,即确定  $(2 T, 5 T)$  时段为 B 方式,  $(5 T, 7 T)$  时段为 C 方式 ..... 如此反复直至运行方式全部确定,如图 2(c) 所示。

## 2 讨论

### 2.1 有功损耗的计算

负荷预测的结果可以得出配电网各个区域的用复数功率表示的负荷,该负荷可以认为是不随运行方式的切换而改变的。在计算  $K$  时间段内的有功损耗时,区域  $m$  的负荷  $S_m(K)$  可采用  $K$  时刻的负荷  $S_m^K$  与  $K+1$  时刻的负荷  $S_m^{K+1}$  的平均值,即

$$S_m(K) = (S_m^K + S_m^{K+1}) / 2 \quad (6)$$

当然,  $S_m(K)$  也可采用  $K-1$ 、 $K$  和  $K+1$  时刻的负荷插值得来。

因此对应于某一种确定的运行方式,可以根据式(1)计算出流过各个节点的复数功率。由于 10 kV 配电线路较短,沿线电压的幅值和相角与主变电站 10 kV 母线相差很小,因此可近似认为沿线电压不变,则流过节点  $m$  的电流  $I_m$  为:

$$I_m = \frac{S_m^*}{U^*} = I_{mR} + j I_{mI} \quad (7)$$

其中:  $I_{mR}$  和  $I_{mI}$  分别为流过节点  $m$  的电流的实部和虚部, \* 表示复数的共轭。

对于如图 2 所示的馈线段 AB, 其长度为  $L$ , 单位长度阻抗为  $r + jx$ , 用  $I_D$  表示 AB 间供出的总电流,则有:

$$I_{DR} = I_{AR} - I_{BR}, I_{DI} = I_{AI} - I_{BI} \quad (8)$$

其中:  $I_{AR}$ 、 $I_{BR}$  和  $I_{DR}$  分别为电流  $I_A$ 、 $I_B$  和  $I_D$  的实部,  $I_{AI}$ 、 $I_{BI}$  和  $I_{DI}$  分别为电流  $I_A$ 、 $I_B$  和  $I_D$  的虚部。

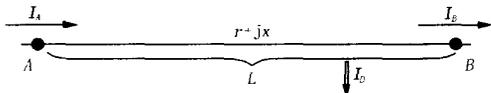


图2 一条典型的馈线

Fig.2 A typical feeder

近似地认为  $I_{DR}$  和  $I_{DI}$  在  $AB$  间为均匀分布, 它们的密度分别为  $I_{DR}/L$  和  $I_{DI}/L$ , 则距  $A$  端  $l$  处的电流为<sup>[7]</sup>:

$$I(l) = I_{AR} - I_{DR}/L + j(I_{AI} - I_{DI}/L) \quad (9)$$

据此可以得到距  $A$  端  $l$  处的线元  $dl$  的有功损耗功率为:

$$P_{LOSS}(l) dl = r[(I_{AR} - I_{DR}/L)^2 + (I_{AI} - I_{DI}/L)^2] dl \quad (10)$$

因此整段馈线的有功损耗功率为:

$$P_{LOSS} = \int_0^L P_{LOSS}(l) dl = R[I_{AR}^2 + I_{AI}^2 - I_{AR}I_{DR} - I_{AI}I_{DI} + (I_{DR}^2 + I_{DI}^2)/3] \quad (11)$$

$T$  时间内的有功损耗电量  $W$  为:

$$W = P_{LOSS} TC \quad (12)$$

其中:  $C$  为单位电价。对于区域内存在  $T$  接点分支的情形, 要将区域供出的总电流  $I_D$  按照一定的比例分配到各个分支上, 该分配比例的确定可以参考各个分支的额定负荷、负荷类型和掌握的用电规律等。

### 2.2 电压降落的求取

根据图 2 可以得出距  $A$  端  $l$  处的线元  $dl$  的电压降落为:

$$vd_l = (r+jx)[I_{AR} - I_{DR}/L + j(I_{AI} - I_{DI}/L)] dl \quad (13)$$

因此  $AB$  之间的电压降落为:

$$V = \int_0^L vd_l = \{ R(I_{AR} + I_{BR}) - X(I_{AI} + I_{BI}) + j[R(I_{AI} + I_{BI}) + X(I_{AR} + I_{BR})] \} / 2 \quad (14)$$

对于区域内存在  $T$  接点分支的处理方法同 2.1 节。

在配电网优化过程中, 各个节点的电压必须在规定范围内, 这一要求被当作约束条件。

表 1 各区域的负荷预测结果

Tab.1 Load forecasting results of each distribution region

kVA

时段	$S_{1,2}$	$S_{2,3}$	$S_{3,4,9}$	$S_{9,10}$	$S_{10,11}$	$S_{11,12}$	$S_{4,5}$	$S_{5,6}$	$S_{6,7}$
周五 a	124 13°	95 11°	325 9°	195 11°	20 16°	354 17°	19 10°	129 9°	346 17°
周五 b	46 13°	87 11°	108 8°	18 9°	19 15°	309 16°	34 9°	21 8°	509 16°
周五 c	119 12°	1684 10°	136 9°	23 10°	1067 14°	908 15°	23 9°	17 6°	417 15°
周五 d	85 15°	1424 13°	105 16°	18 13°	625 11°	416 11°	20 12°	16 10°	457 11°
周五 e	2205 34°	1895 27°	1401 31°	1073 13°	1205 10°	1654 11°	998 15°	980 16°	1237 11°
周五 f	3249 35°	2876 26°	1382 30°	2021 16°	1847 11°	2851 12°	1706 17°	1209 17°	1805 12°
周五 g	48 19°	83 13°	126 21°	38 18°	1045 9°	678 19°	895 18°	893 16°	506 19°
周五 h	3421 31°	3956 25°	1423 33°	2116 17°	2058 11°	1205 11°	31 17°	12 17°	321 11°
周五 i	2976 32°	3683 24°	1894 34°	2205 18°	2520 14°	2839 15°	2416 16°	2843 16°	1704 15°
周五 j	308 17°	543 12°	573 15°	982 16°	769 18°	558 17°	473 15°	314 16°	985 17°
周五 k	1760 13°	137 13°	188 14°	36 15°	1030 21°	821 20°	32 12°	1123 10°	1421 20°
周五 l	119 12°	102 12°	136 13°	23 13°	1067 20°	908 19°	3267 9°	1321 9°	1008 19°
周六 a	85 12°	986 11°	1123 13°	1298 11°	625 18°	416 17°	20 10°	1402 10°	634 17°
周六 b	71 11°	1031 11°	1321 12°	2021 10°	498 17°	389 17°	19 10°	1186 9°	579 16°
周六 c	1034 11°	1235 10°	1402 12°	2398 9°	368 16°	279 16°	20 9°	598 9°	467 15°
周六 d	2021 12°	998 11°	1186 13°	2116 10°	459 11°	348 13°	21 10°	17 10°	597 11°
周六 e	2398 13°	473 13°	598 18°	2205 16°	678 10°	469 12°	620 15°	446 14°	789 11°
周六 f	2116 13°	363 15°	275 19°	982 16°	1047 11°	838 11°	1123 17°	933 18°	987 12°
周六 g	2205 10°	278 16°	92 13°	2458 18°	1112 19°	913 18°	1321 18°	1029 17°	1167 19°
周六 h	982 13°	387 15°	1123 17°	2346 17°	1247 11°	1036 11°	1402 17°	1212 16°	1238 11°
周六 i	102 12°	233 15°	1321 18°	2275 18°	1003 14°	801 14°	1186 16°	1063 16°	1154 15°
周六 j	56 11°	159 12°	1402 16°	1307 16°	1108 17°	709 16°	598 15°	628 16°	1258 17°
周六 k	231 11°	193 12°	1186 12°	37 14°	969 17°	563 18°	29 14°	3217 11°	921 16°
周六 l	983 10°	132 11°	598 11°	34 12°	633 15°	432 15°	3254 12°	22 9°	748 15°

注:a~l时段分别为从0:00~24:00间、以2h为间隔的各个时间段。

### 3 实例

例如,对于如图 3 所示的具有三个电源点的配电网,节点 1、7 和 12 分别代表三个电源,空心圆圈代表联络开关,黑心圆圈代表分段开关,馈线采用 LJ-120,线间几何均距为 1m,  $r=0.27 \text{ } / \text{ km}$ ,  $x=0.327 \text{ } / \text{ km}$ ,单位电价  $C=0.5 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,  $W_s$  分别取 5000 元、15000 元和 30000 元,电源节点 1、7 和 12 的电压分别为 10.1 kV、10.5 kV 和 10.3 kV,各区域的负荷预测结果如表 1 所示,并且  $S_{3,8}:S_{8,4}:S_{8,9}=0.3:0.7:0$ 。各馈线长度分别为: $L_{1,2}=680 \text{ m}$ ,  $L_{2,3}=1470 \text{ m}$ ,  $L_{3,8}=300 \text{ m}$ ,  $L_{8,4}=700 \text{ m}$ ,  $L_{8,9}=30 \text{ m}$ ,  $L_{4,5}=860 \text{ m}$ ,  $L_{5,6}=1170 \text{ m}$ ,  $L_{6,7}=1520 \text{ m}$ ,  $L_{9,10}=810 \text{ m}$ ,  $L_{10,11}=1370 \text{ m}$ ,  $L_{11,12}=1220 \text{ m}$ 。

采用本文描述的方法进行优化,第二步~第四步优化的结果如表 2 所示。可见,在第二步仅仅获得了各个时间段的最优方式(称为初步结果),第三步将相邻时间段的相同方式进行了合并,在第四步则根据  $K$  和  $K+1$  两个时段间进行方式切换的收益是否达到方式切换最小收益阈值  $W_s$  决定是否进行方式切换,从而获得最终优化结果。

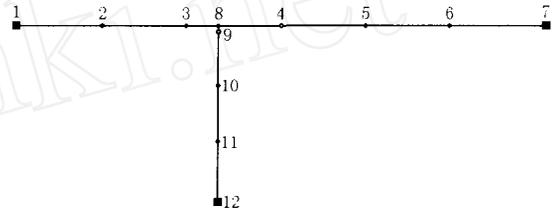


图 3 一个具有三个电源点的配电网

Fig. 3 A distribution network with three power sources

表 2 配电网动态优化结果

Tab. 2 Results of dynamic optimization of a distribution network

时间段	第二步		第三步 方式合并结果	第四步													
	初步结果	W/元		$W_s=5000 \text{ 元}$			$W_s=15000 \text{ 元}$			$W_s=30000 \text{ 元}$							
				最终结果	$g(K, K)$	$g(K, K+1)$	情况	最终结果	$g(K, K)$	$g(K, K+1)$	情况	最终结果	$g(K, K)$	$g(K, K+1)$	情况		
周五 a	A	2643	A	A	46079	42506	1	A	46079	42506	1	A	46079	42506	1		
周五 b	E	12257	E														
周五 c	E	27606															
周五 d	A	105998	A														
周五 e	A	411471															
周五 f	A	236123			976251	971573	1			976251	971573		1		976251	971573	1
周五 g	C	171902	C														
周五 h	A	667009	A														
周五 i	A	394455			2094465	2093875	1			2094465	2093875		1		2094465	2093875	1
周五 j	B	56160	B		2238917	2209287	2			2238917	2209287		2		2238917	2209287	1
周五 k	F	114822	F		307939	278017	2			307939	278017		2		2404455	2402112	1
周五 l	B	163195	B		468335	467270	1		B	468335	467270		1				
周六 a	A	134570	A														
周六 b	A	169504		638795	633010	2		638795		633010	1		2877990	2873205	1		
周六 c	C	164675	C	477216	456320	2		951026	930440	2							
周六 d	A	151489	A				A										
周六 e	A	140156		484667	477254	2			484667	477254	1						
周六 f	D	185609	D	1010503	943217	2							3362657	3355244	1		
周六 g	A	278004															
周六 h	A	281200	A														
周六 i	A	189404		1055511	1047945	2			1540179	1532612	1		4418169	4410602	1		
周六 j	B	130754															
周六 k	B	159583	B														
...		...		...	...				...	...			...	...			

表 2 中各种方式分别对应的联络开关如表 3 所示。

表 3 表 2 中各种方式分别对应的联络开关

Tab. 3 The loop points of each network topology

方式	A	B	C	D	E	F
联络开关	节点 4 和 9	节点 5 和 9	节点 3 和 9	节点 4 和 10	节点 3 和 10	节点 5 和 10

## 5 结论

多数文献报道的配电网重构方法,都是根据当前时间断面的负荷数据进行的,考虑到配电网负荷数据的变动性,这些方法可能会导致较频繁地进行方式切换的不利情形。本文提出一种考虑负荷变化的配电网动态优化方法,可以依据负荷预测结果,得出在未来一段时间内的优化运行方式和切换时机,通过定义方式切换最小收益阈值,避免了切换收益小或刚切换不久又要进行方式调整的不必要的方式切换,减少了开关操作次数。方式切换最小收益阈值取得越大,运行方式切换机会往往也越少;方式切换最小收益阈值取得越小,运行方式切换机会往往也越多。

### 参考文献:

- [1] Nara K, Shiose A, Kitagawa M. Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1044-1051.
- [2] CHANG Hong-chan, KUO Cheng-chien. Network Reconfiguration in Distribution Systems Using Simulated Annealing[J]. Electric Power Systems Research, 1994 (29): 227-238.
- [3] LIN Wei-min, Chin Hong-chan. A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(3): 870-875.
- [4] Goswami S K, Basu S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [5] 刘健,董海鹏,蔡建新(LIU Jian, DONG Hai-peng, CAI Jian-xin). 配电网事故判断与负荷均衡化(Fault Section Identification and Load Balancing of Distribution Network) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(22): 34-38.
- [6] 刘健,勾新鹏,徐精求,等(LIU Jian, GOU Xin-peng, XU Jing-qiu, et al). 基于区域负荷的配电网超短期负荷预测(Short Term Load Forecasting of Distribution Networks Based on Part Loads) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(19): 34-37.
- [7] Wanger T P, Chikani A Y, Hackam R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: An Application of Distribution of Distribution Automation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1922-1931.

收稿日期: 2003-10-20; 修回日期: 2004-12-01

### 作者简介:

刘健(1967-),男,博士,教授,IEEE高级会员,博士生导师,研究领域为电力系统自动化;

E-mail: edliu@bylink.com.cn

徐精求(1967-),女,博士生,研究领域为安全技术及安全工程和配电系统自动化;

董海鹏(1973-),男,工程师,研究领域为配电系统自动化。

## Distribution networks dynamic optimization considering load changes

LIU Jian<sup>1,2</sup>, XU Jing-qiu<sup>1</sup>, DONG Hai-peng<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Galaxy Electric Power Automation Co., Ltd, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** In order to reduce the times of changing of distribution network topologies, a new method to optimize distribution networks considering load changes is put forward. The investigated period is divided into time sections. Based on the load forecasting results, the optimal topologies of each time section are worked out with the indices of minimal losses. The adjacent time sections with the same topology are merged into one time section. A threshold value of least benefit by topology shifting is introduced. Only the few changes of distribution network topologies with benefit larger than the threshold value are permitted. Consequently, the unnecessary network reconfigurations with less benefit or need to be changed into another better operation mode after a short duration of time are avoided and the exact moments of topology shifting are determined. Simplified calculation of line losses and voltage drop without adequate information are discussed as well. An instance shows that the proposed approach is feasible.

**Key words:** distribution networks; distribution network reconfiguration; optimization; distribution automation