

Двухэтапный алгоритм деления электрической сетиВ.Н. Гинз¹, М.В. Губко^{1,2}¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН

² Сколковский Институт Науки и Технологий

Деление электрической сети – механизм, позволяющий препятствовать полному отключению сети после аварии. Он заключается в разделении сети на несколько электрически изолированных частей. Этот метод является крайней мерой, так как его применение так же вносит возмущение в сеть, которое может препятствовать переходу сети в устойчивое состояние. Также существует вероятность того что изолированные части не смогут обеспечивать генерацией весь объем нагрузки.

В литературе описаны различные подходы к выбору функции затрат и решению задачи. В [1] минимизировалась разница генерации и нагрузки внутри частей сети через решение задачи смешанного линейного программирования. В [2] решалась задача, в которой критерием было нарушение когерентности генераторов и было предложено для минимизации того критерия использовать спектральную кластеризацию. В [3] исследовалась задача изолирования «аварийной» части сети через решение задачи смешанного линейного программирования. В работе [4] спектральная кластеризация использовалась для минимизации потоков мощности, разрываемых в процессе деления сети, а в работе [5] критерий оптимизации был дополнен требованием когерентности групп генераторов. Исследование, о котором пойдет речь в докладе, является развитием работ [3, 5]; вдобавок мы минимизируем сброс нагрузки в ходе операции деления сети.

В рамках нашей модели электрическую сеть можно представить в виде графа. Вершины графа соответствуют элементам электрической сети, а ребра соответствуют линиям. Вершины графа можно разделить на две группы: генераторы и потребители. Деление электрической сети – это разделение всех вершин на заданное число K групп и удаление ребер, соединяющих вершины разных групп.

Для построения критерия оптимизации над множеством элементов электрической сети строится граф, веса ребер которого принимают различные значения:

- Для слагаемого C , связанного с когерентностью генераторов, веса ребер соответствуют коэффициенту когерентности пар генераторов.
- Для слагаемого P , учитывающего разрыв потоков мощности, вес ребра равен потоку активной мощности, протекающей по линии, соединяющей узлы. Для узлов, которые не соединены напрямую в электрической сети, этот коэффициент равен нулю.

Числовые значения этих частей критерия вычисляются через разрез соответствующего графа, который равен сумме весов ребер, удаляемых в процессе деления электрической сети.

Количественное выражение энергообеспеченности S вычисляется как сумма недостатка в электроэнергии по всем получившимся после деления, подсетям. Этот недостаток вычисляется путем решения задачи оптимального потокораспределения (Optimal Power Flow, OPF) для модели переменного тока. Эта задача является задачей нелинейной оптимизации. Модель постоянного тока представляет собой более простую задачу линейного программирования, но решение является менее точным. Наименее точным, но простым является представление энергообеспеченности как разности объемов генерации и потребления в подсети.

Таким образом, итоговый критерий представляет собой взвешенную сумму этих частей:

$$F = \alpha_C C + \alpha_D D + S$$

Для решения этой задачи предлагается использовать двухэтапный алгоритм. На первом шаге применяется спектральная кластеризация для разбиения сети на $rK, r > 1$ частей при минимизации критерия F без учета компоненты энергообеспеченности S .

На втором шаге алгоритма строится агрегированная сеть, вершины которой представляют собой кластеры, полученные на первом шаге алгоритма. Агрегированная сеть разбивается ровно на K подсетей учитывая полный критерий F путем точного решения задачи смешанного квадратичного программирования с использованием пакета CPLEX 12.

При этом вычислительная сложность второго шага алгоритма не зависит от размерности задачи, а лишь от необходимого количества кластеров и параметра r . Это позволяет решать задачу быстро даже для сетей большого размера.

Литература

1. *N. Fan, D. Izraelevitz, F. Pan, P. M. Pardalos, J. Wang.* A mixed integer programming approach for optimal power grid intentional islanding // *Energy Systems*. 2012. V. 3, P. 77-93.
2. *L. Ding, F. Gonzalez-Longatt, P. Wall, V. Terzija.* Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013. V. 28, N 1. P. 75-84.
3. *P.A. Trodden, W.A. Bukhsh, A. Grothey, K. McKinnon.* MILP formulation for controlled islanding of power networks // *Electrical Power and Energy Systems*. 2013. V. 45, P. 501-508.
4. *R. Sanchez-Garcia, M. Fennelly, S. Norris, N. Wright, G. Niblo, J. Brodzki, J. Bialek.* Hierarchical Spectral Clustering of Power Grids // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. V. 29, N 5. P. 2229-2237.
5. *J. Quiros-Tortos, R. Sanchez-Garcia, J. Brodzki, J. Bialek, V. Terzija.* Constrained Spectral Clustering Based Methodology for Intentional Controlled Islanding of Large-Scale Power Systems // *IET Generation Transmission & Distribution*. 2015. V. 9, N 1. P. 31-42.