МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА ТРУБОГЕНРЕРАТОРА С ВОДОРОДНО-ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF THE PROTOTYPE OF A HYDROGEN-WATER-COOLED TUBE GENERATOR

УДК 621.314

Марков М.А. магистр Институт энергетики Высшая школа высоковольтной энергетики Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, г. Санкт-Петербург

Markov M. A. mmarkov9@yandex.ru

Аннотация

В настоящей статье опробована методика оптимизации параметров турбогенератора с водородно-водяным охлаждением. Многокритериальная оптимизация выполнена посредством генетического алгоритма недоминируемой сортировки NSGA-II. Оптимальность рассматривается в смысле получения конструкции турбогенератора, который обладает улучшенными значениями исследуемых целевых функций: коэффициент полезного действия, масса меди обмоток статора и ротора, продольное синхронное индуктивное сопротивление. Результаты оптимизации сопоставлены с исходным прототипом генератора.

Summary

In this article, a technique for optimizing the parameters of a turbine generator with hydrogen-water cooling has been tested. Multicriteria optimization using the NSGA-II genetic nondominated sorting algorithm. Optimal design in the sense of using the design of a turbine generator with improved values of the studied target

functions: efficiency, copper mass of the stator and rotor windings, longitudinal synchronous inductive reactance. The optimization results are compared with the original generator prototype.

Ключевые слова: турбогенератор, синхронный, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, оптимизация параметров, КПД турбогенератора, индуктивное сопротивление турбогенератора, водородно-водяное охлаждение.

Key words: turbine generator, synchronous, multicriteria optimization, genetic algorithm, optimization of turbine generator efficiency parameters, inductive resistance of a turbine generator, hydrogen-water cooling.

Введение

Данная статья дает представление о проектных решениях по оптимизации параметров турбогенератора с водородно-водяным охлаждением серии ТВВ, на номинальную мощность 360 МВт [1]. Исследуемым прототипом является соответственный генератор данной серии, который производится серийно на машиностроительных предприятиях.

В настоящей работе оптимизация производится для нескольких целевых функций (критериев качества) в одно время. В настоящее время методика решения данных проблем продолжает стремительно совершенствоваться, а также по причине высокого быстродействия современных компьютеров, представилась возможность решать задачи многокритериальной оптимизации для различных устройств, а именно появилась возможность оптимизировать такие электротехнические устройства как турбогенераторы, которые имеют достаточно сложную конструкцию [2]. Несмотря на то, что данные методы решения задач многоцелевой оптимизации появились лишь в последнее время, однако опыт решения рассматриваемых проблем имеется [3].

Турбогенератор представляет из себя сложную дорогостоящую генерирующую установку синхронного типа, поэтому оптимизация его параметров представляется наиболее актуальной задачей, тем более

проектирование турбогенераторов в Российской Федерации выполняется по отработанным типовым методическим указаниям [1]. В момент проектирования предпочтительно осуществить определенный направленный (относительно целевых функций рассматриваемой оптимизации) анализ исполнения различных конструкционных вариантов [4].

Цель данной работы это – формирование и проверка на заранее отработанном прототипе электротехнического устройства способа многокритериальной оптимизации, которая основана на метаэвристическом алгоритме, благодаря которому можно совершенствовать проектные прототипы неявнополюсных синхронных генераторов, фактически используя перебор крупного количества прототипов.

Методы и принципы исследования

Многокритериальная оптимизация параметров осуществлена с помощью генетического алгоритма, который является процессом поисковой оптимизации, осуществленный на генетических принципах, а также процессе естественного отбора [5].

Прототип турбогенератора представляет из себя некоторое число параметров, которые необходимо разделить на две категории. К первой категории отнесем параметры, которые заимствованы у исходного генератора, данная группа параметров не будет изменена во время оптимизации (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Параметрическое представление турбогенератора ТВВ-360

Категория / номер	Параметр	Значение	Единица измерения
1 категория / 1	P, номинальная мощность	360	МВт
1 категория / 2	$cos\varphi$, коэффициент мощности	0.85	-
1 категория / 3	n, частота оборотов ротора	3000	об/мин
1 категория / 4	f, частота сети переменного тока	50	Гц
1 категория / 5	m, количество фаз	3	-
1 категория / 6	соединение фаз	звезда (Y)	-
1 категория / 7	W, перегружаемость	1.65	-
1 категория / 8	охлаждение	ТВВ	-
2 категория / 1	D_1, диаметр статора	1.325-1.345	м

2 категория / 2	D_2, диаметр ротора	1.115-1.135	м
2 категория / 3	$b_п$, ширина паза	0.028-0.032	м
2 категория / 4	$h_к$, высота клина	0.015-0.035	м
2 категория / 5	$b_{пак}$, ширина одного пакета	0.06-0.085	м
2 категория / 6	$b_{кан}$, ширина канала для вентиляции	0.008-0.012	м
2 категория / 7	U, номинальное напряжение	10.5-24	кВ
2 категория / 8	$b_{пол}$, ширина канала полого проводника	0.0015-0.0025	м
2 категория / 9	$h_{пол}$, высота канала полого проводника	0.004-0.005	м
2 категория / 10	h_1, двусторонняя толщина изоляции стержня для высоты	0.01-0.02	м
2 категория / 11	h_2, толщина прокладки под клин	0.0005-0.0015	м
2 категория / 12	h_3, толщина прокладки на дне паза	0.0005-0.0015	м
2 категория / 13	h_4, толщина прокладки между стержнями	0.004-0.006	м

Ко второй категории отнесем те параметры, которые можно изменять в заранее определенных границах для этих параметров, которые можно свободно изменять в процессе проектирования (см. таблицу 1).

В итоге у нас получилось 13 варьируемых величин, которые являются оптимизационными параметрами, которые необходимо найти, для того чтобы усовершенствовать конструкцию прототипа генератора на основе некоторых целевых функций.

В рамках данной оптимизации выберем следующие целевые функции: коэффициент полезного действия η, масса меди статорной и роторной обмоток G, продольное синхронное индуктивное сопротивление X_d. Далее необходимо рассмотреть наборы критериев, по которым будет произведена оценка полученного результата оптимизации.

Рассмотренные наборы оптимизационных критериев (целевых функций):

1. Генератор с максимальным значением η при G и X_d меньше или равных референсному.

2. Турбогенератор, который имеет минимальную G (чтобы снизить массогабаритные параметры исследуемого устройства).

3. Генератор с минимальным X_d (для более плавного управления и большей устойчивости в переходных процессах).

Следует отметить, что некоторые критерии оптимизации являются противоречивыми, а именно: при уменьшении G уменьшается значение η, а также уменьшение X_d способствует увеличению G и снижению η.

Референсные значения целевых функций исследуемого прототипа η=97.84 %; G=13805.6 кг; X_d=251.3 %, представлены на рис. 1 и в таблице 2. На рисунках 2-4 представлены проекции для данной референсного значения (точка) на рассматриваемые плоскости координат.

Работа выполнена в мультипарадигмальной среде программирования *MATLAB*, а многоцелевая оптимизация выполнялась на основе генетического алгоритма недоминируемой сортировки *NSGA* (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) [6]. Параметры генетического алгоритма: количество особей в одной популяции - 10000; поколения - 120; целевые функции - 3; варьируемые параметры - 13.

Основные результаты

В результате расчета имеем двусвязный Парето-фронт, который в 3D представлении является совокупностью некоторых поверхностей (рис. 1). Очевидно, что практически все точки множества решений являются лучше, чем референсная точка. Анализ результата (рис. 1) весьма удобно осуществлять, рассматривания сечения Парето-фронта, которые параллельны каждой из координатных плоскостей.

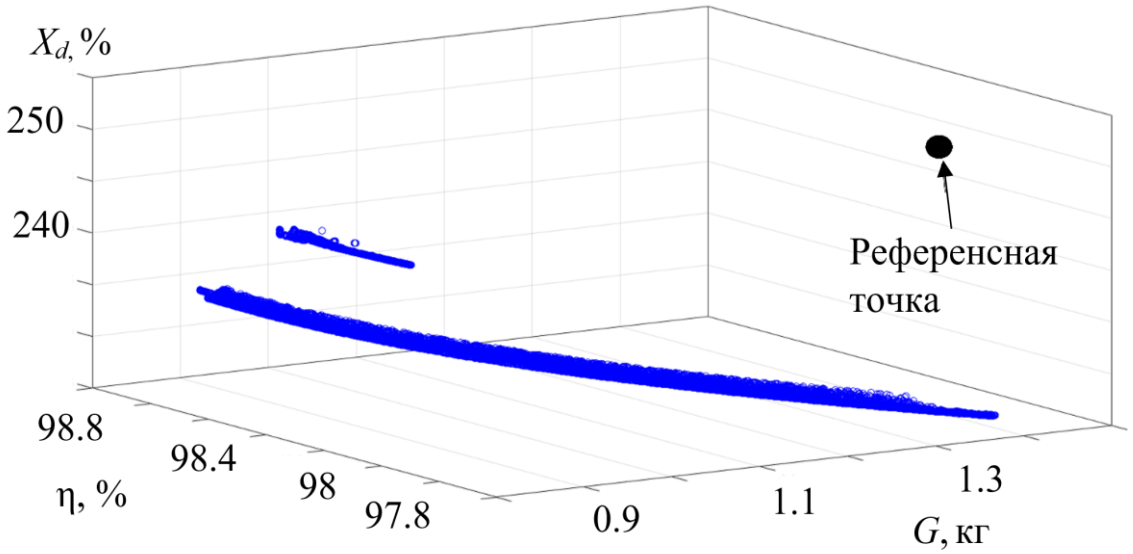


Рис. 1 - Результат оптимизации

Проведем анализ полученных результатов. Рассмотрим рисунки 2-4, на которых изображены сечения Парето-фронта для значений каждой из целевых функций, каждое из которых представляется как множество Парето только для двух целевых функций. В соответствии с рисунком 2, на котором рассмотрены зависимости для полученного минимального значения X_d, в данном случае η увеличивается из-за увеличения массы генератора. Но осуществленный расчет дает представление не только о количественных характеристиках рассмотренной связи, а также демонстрирует тот факт, что связей две (прямые 1 и 2 на (рис. 2)). Первая прямая наиболее многообещающая, так как при увеличении G осуществляется стремительное увеличение η. Наличие двух связей обусловлено тем, что Парето-фронт (рис. 1) - двусвязный.

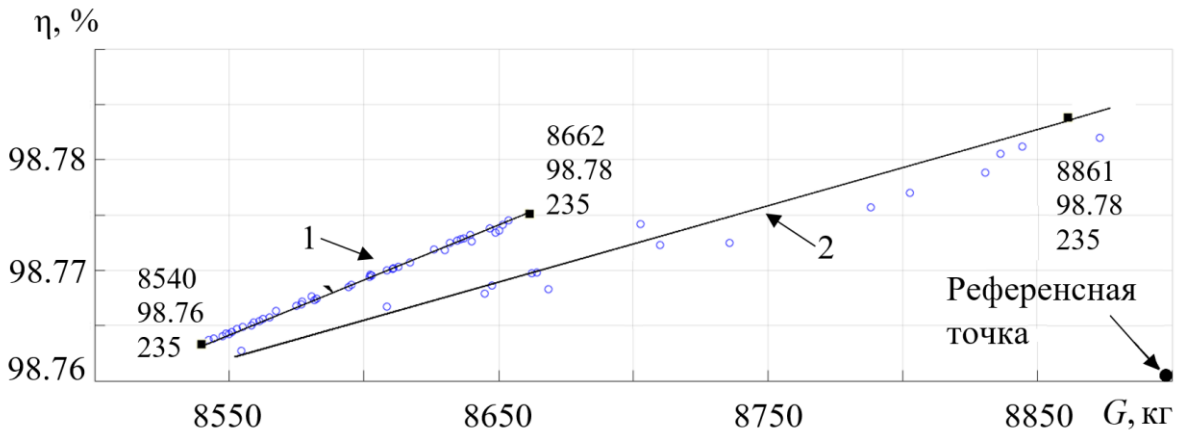


Рис. 2 - Результат оптимизации при наименьшем значении X_d

Множество решений для наибольшего значения η изображено на (рис.3). Данное множество также является двусвязным. В соответствии с распределением можно сказать, что при увеличении *G*, (а соответственно и массогабаритных размеров), X_d снижается. В данном случае наиболее интересным представляется факт того, что соответсвенное тенденция на снижение довольно низкая (изменение происходит только с четвертого знака после запятой для X_d). Данное свойство полного фронта можно отметить и на и 3D графике (рис.1). Следовательно, когда уменьшается площадь сечения единичного проводника, то его индуктивность внутри или остается на том же уровне или незначительно меняется, а внешняя обычно растет [7]. В данном множестве решений наиболее привлекательна прямая 1 (рис. 3).

На рисунке 4, представлено распределение для промежутка (от *G*=8550 кг до *G*=8650 кг) с минимальными значениями *G*. Множество Парето - односвязное. Однако, алгоритм нашел несколько значений минимальной *G*. В соответствии с рисунком, уменьшение X_d вызвано резким уменьшением η, можно сделать вывод о том, что рассмотренный критерий является необязательным в данной оптимизации, а может использоваться только для проектирования генераторов со специальными характеристиками (рис. 4) [8].

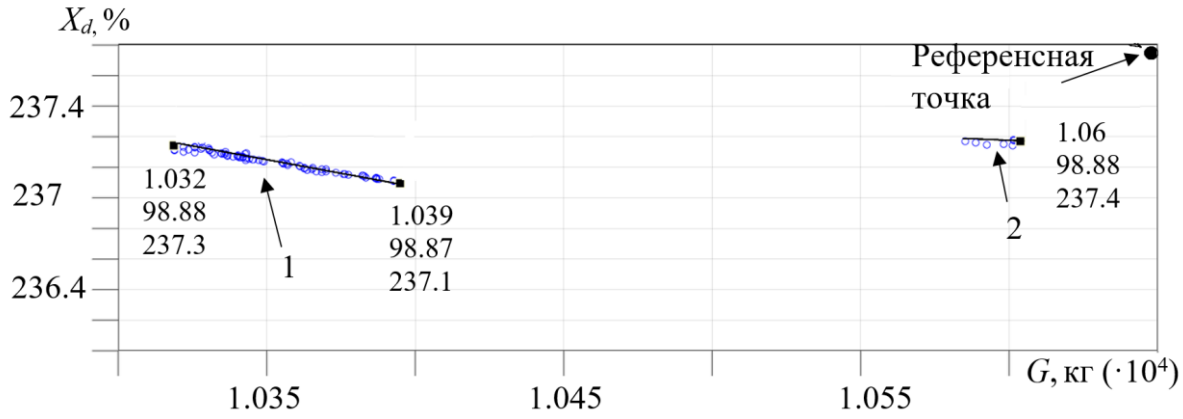


Рис. 3 - Результат оптимизации при наибольшем η

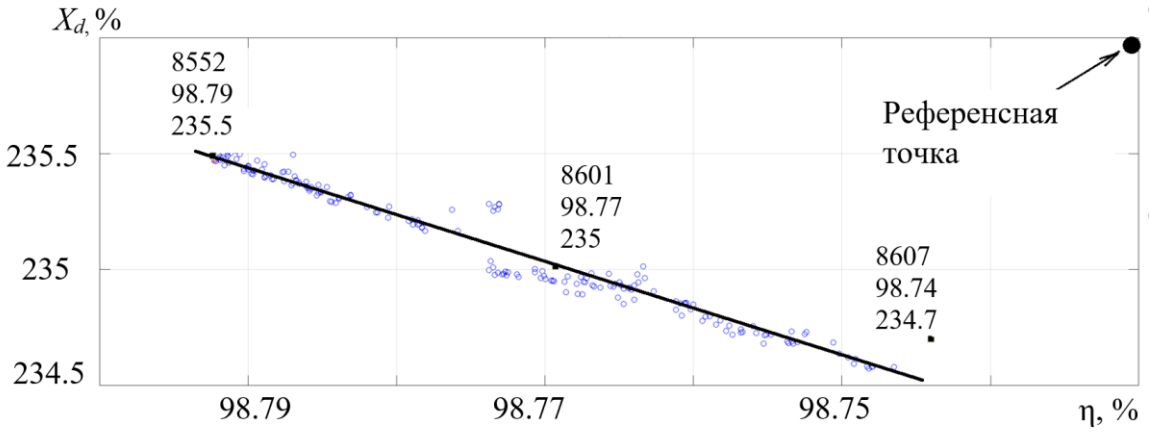


Рис. 4 - Результат оптимизации при наименьшем значении G

Заключение

В настоящей работе отработана методика, благодаря которой получены следующие оптимизационные цели:

1. Величину η увеличили до 98.88 % (на 1.04 %), а *G* снизили до 10320 кг, (на 3485.6 кг меньше, чем для референсного турбогенератора);

2. *G* уменьшено до величины 8552 кг (на 5253.6 кг меньше референсного). η генератора увеличилось до 98.79%;

3. X_d снижено до 235 %, данное значение меньше референсного на 16.3 %.

Таблица 2 - Сравнение полученных данных

Критерии	Референсная точка	Значения критериев при наименьшем *G*	Значения критериев при наибольшем η	Значения критериев при наименьшем X_d
η, %	97.84	98.79	98.88	98.78
G, кг	13805.6	8540	10320	8861
X_d, %	251.3	235.5	237.3	235

Использованные источники:

1. Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. Проектирование турбогенераторов - Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отделение, 1987. – 256 с.

2. Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Управление установившимися режимами энергосистем с использованием векторного критерия качества, Электричество. 2015. № 1. С. 13-19.

3. Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Разработка моделей электроэнергетических систем для анализа надёжности обеспечения баланса мощности, Электрические станции. 2015. № 11 (1012). С. 47-53.
4. Богуславский И.З., Коровкин Н.В. Неустановившиеся режимы асинхронных машин с несимметричной клеткой, Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 2. С. 57-68.
5. Силин Н.В., Коровкин Н.В. Электромагнитных контроль электроэнергетического оборудования, Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. № 4 (63). С. 186-192.
6. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Использование билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощностей в энергосистемах. Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 1. С. 77-80.
7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Теоретические основы электротехники, СПб, Питер, 2009, т1 510 стр, т.2 430 стр.
8. Коровкин Н.В., Потиенко А.А. Использование генетического алгоритма для решения задач электротехники, Электричество. 2002. № 11. С. 2-15.
9. Силин Н.В., Коровкин Н.В. Электромагнитный контроль Электроэнергетического оборудования, Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. № 4 (63). С. 186-192.
10. Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции, Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 124-133.

Sources used:

1. G. M. Khutoretsky, M. I. Tokov, E. V. Tolvinskaya. Design of turbo generators-L.: Energoatomizdat: Leningr. Department, 1987. - 256 p.
2. Korovkin N. V., Odintsovo M. V., Frolov O. V. Management of established modes of power systems using vector quality criteria, Electricity. 2015. no. 1. Pp. 13-19.
3. Belyaev N. A., Egorov A. E., Korovkin N. V., Chudny V. S. Development of models of electric power systems for the analysis of reliability of power balance, Power stations. 2015. no. 11 (1012). Pp. 47-53.
4. Boguslavsky I. Z., Korovkin N. V. Unsteady modes of asynchronous machines with an asymmetric cell, proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2015. no. 2. Pp. 57-68.
5. Silin N. V., Korovkin N. V. Electromagnetic control of electric power equipment, Scientific and technical Bulletin of the Saint Petersburg state Polytechnic University. 2008. no. 4 (63). Pp. 186-192.
6. Belyaev N. A., Korovkin N. V., Frolov O. V., Chudny V. S. Using the bilinear theorem to solve problems of optimizing capacity flows in power systems. Electrical complexes and control systems. 2012. no. 1. Pp. 77-80.
7. Demirchyan K. S., Neyman L. R., Korovkin N. V., Theoretical foundations of electrical engineering, St. Petersburg, St. Petersburg, 2009, T1 510 pages, vol. 2 430 p.
8. Korovkin N. V., Potienko A. A. Use of genetic algorithm for solving problems of electrical engineering, Electricity. 2002. No. 11. P. 2-15.
9. Silin N. V., Korovkin N. V. Electromagnetic control of Electric power equipment, Scientific and technical Bulletin of the Saint Petersburg state Polytechnic University. 2008. no. 4 (63). Pp. 186-192.
10. Doronin M. V., Greshnyakov G. V., Korovkin N. V. Magnetic screens of special design, Scientific and technical Bulletin of Spbpu. Natural and engineering Sciences. 2017. Vol. 23. No. 1. Pp. 124-133.