

Оптимизация мощности потерь в ключевых элементах трёхфазного инвертора напряжения

Игорь Воронин (Москва)

В статье проводится анализ эффективности применения жёсткой и мягкой коммутации в полном диапазоне выходной мощности инвертора.

Инновационное развитие энергетики, повышение энергоэффективности и энергосбережения являются основными приоритетами экономического и технологического развития России на ближайшие годы.

Наиболее актуальными задачами при разработке энергетически эффективных преобразователей электроэнергии являются:

- повышение коэффициента полезного действия;
- увеличение частоты преобразования;
- уменьшение массы и габаритов;
- снижение уровня импульсных помех;

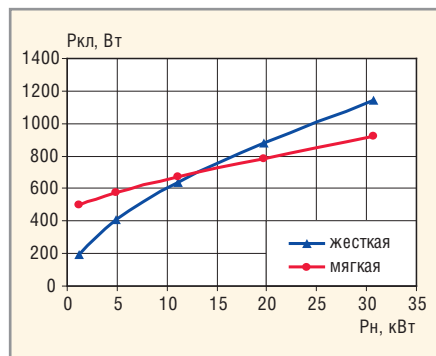


Рис. 1. Зависимость суммарной мощности потерь $P_{кл}$ в ключевых элементах инвертора от выходной мощности нагрузки P_n при жёсткой и мягкой коммутации

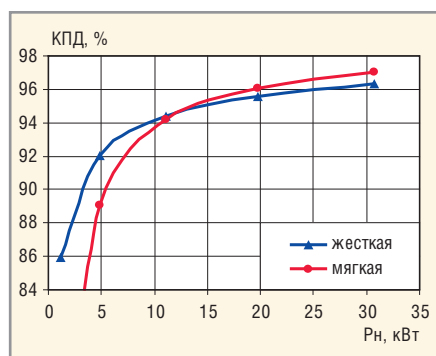


Рис. 2. Зависимость КПД схемы от выходной мощности нагрузки P_n при жёсткой и мягкой коммутации

- обеспечение электроэнергетической и электромагнитной совместимости с питающей сетью и нагрузкой.

Основные способы снижения энергии потерь в ключевых элементах трёхфазного инвертора напряжения были рассмотрены в работе [1]. В представленном анализе наиболее эффективным вариантом оказался способ мультрезонансной коммутации с включением основных транзисторов инвертора при нулевом напряжении и их выключением при нулевом токе (ПНН-НТ) [2]. При выполнении условий мягкой коммутации, во всех ключевых элементах инвертора удалось существенно снизить энергию динамических потерь. При этом суммарный КПД схемы при номинальной выходной мощности $P_n = 30,7$ кВт оказался выше 97%.

Практическая полезность применения методов мягкой коммутации определяется не только возможностью снижения коммутационных потерь в основных транзисторах схемы. Необходимо также, чтобы общий уровень снижения энергии динамических потерь был выше дополнительных потерь, вносимых в схему вспомогательными элементами резонансной цепи. При этом весьма желательно, чтобы это требование выполнялось в полном диапазоне изменения выходной мощности инвертора.

Применение мягкой коммутации приводит к следующим дополнительным потерям мощности:

- дополнительные потери проводимости в основной схеме из-за протекания токов во встречно-параллельных диодах основных ключей инвертора в течение квазирезонансных процессов;
- потери проводимости во вспомогательных транзисторах, обеспечива-

ющих подключение резонансных контуров;

- потери в конденсаторах резонансных контуров;
- потери в дросселях резонансных контуров.

Динамическими потерями во вспомогательных транзисторах можно пренебречь ввиду их относительной малости, поскольку коммутация данных транзисторов протекает при нулевом токе.

На рисунках 1 и 2 представлены основные энергетические характеристики трёхфазного инвертора напряжения: зависимость суммарной мощности потерь $P_{кл}$ в ключевых элементах инвертора и КПД схемы в полном диапазоне изменения выходной мощности нагрузки P_n для вариантов жёсткой и мягкой коммутации. Расчёт потерь мощности проводился методом численного интегрирования отдельных составляющих для каждого такта коммутации, поскольку данные потери непрерывно изменяются с изменением тока нагрузки инвертора.

В силу специфики работы мультрезонансной схемы мощность дополнительных потерь проводимости, вносимых в схему инвертора вспомогательными элементами резонансной цепи, возрастает при снижении тока нагрузки, и наоборот. Таким образом, на энергетических характеристиках инвертора отчётливо выделяются две области, в одной из которых применение метода мягкой коммутации повышает эффективность процесса преобразования по сравнению с режимом жёсткой коммутации, а в другой, наоборот, оказывается менее эффективным. Выходная мощность нагрузки, соответствующая точке инверсии, равна значению $P_n = 12$ кВт.

Рассмотрим способ оптимизации потерь в ключевых элементах инвертора в полном диапазоне тока нагрузки. Для этого в каждом такте переключения были рассчитаны отдельные составляющие дополнительных потерь $P_{доп}^i$, где индекс i является но-

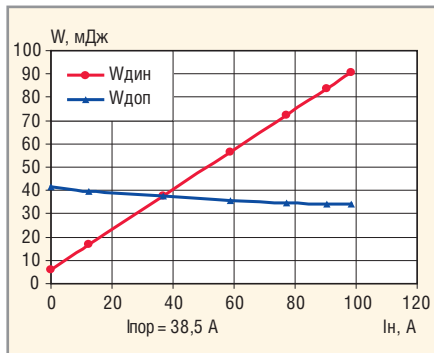


Рис. 3. Зависимость энергии динамических потерь при жёсткой коммутации и добавочных потерь при мягкой коммутации от тока нагрузки

мером коммутации, который на полу-периоде выходной частоты инвертора изменяется от 1 до $N/2$. Тогда среднее значение мощности дополнительных потерь можно определить по формуле:

$$P_{доп} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} P_{доп}^i}{N}. \quad (1)$$

Перепишем формулу (1), преобразовав отдельные составляющие мощности дополнительных потерь $P_{доп}^i$ в кванты энергии дополнительных потерь $W_{доп}^i$:

$$P_{доп} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} P_{доп}^i}{N} = \frac{f_k}{N} \sum_{i=1}^{N/2} W_{доп}^i; \quad (2)$$

где f_k – частота коммутации ключевых элементов инвертора.

Построим зависимость энергии вносимых потерь $W_{доп}^i$ от изменения тока нагрузки на периоде выходной частоты инвертора. Добавим к полученному графику зависимость энергии динамических потерь $W_{дин}^i$ от тока нагрузки I_n при жёсткой коммутации. Пересечение двух зависимостей определяет величину порогового тока нагрузки $I_n = I_{пор}$, начиная с которого целесообразно применение мягкой коммутации (см. рис. 3). При изменении тока нагрузки от нулевого до порогового значения, энергия вносимых потерь $W_{доп}^i$ больше энергии динамических потерь $W_{дин}^i$, поэтому на данном интервале энергетически более выгодно использовать жёсткую коммутацию. Наоборот, при величине тока нагрузки выше порогового проявляются преимущества метода мягкой коммутации.

Значение порогового тока при заданных параметрах электрического режима инвертора [1] при регулиро-

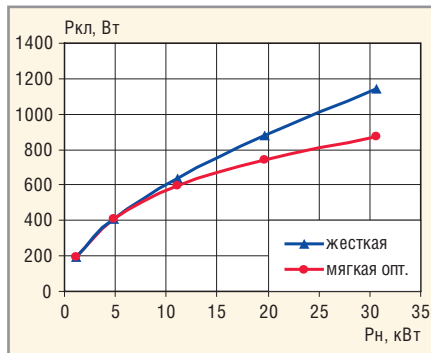


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности потерь $P_{кл}$ в ключевых элементах инвертора от выходной мощности нагрузки P_n при жёсткой и мягкой коммутации при слежении за пороговым током

вании по методу синусоидальной ШИМ составляет $I_{пор} = 38,5$ А. Зависимости суммарной мощности потерь и КПД схемы инвертора от мощности нагрузки для вариантов жёсткой и мягкой коммутации при слежении за величиной порогового тока представлены соответственно на рисунках 4 и 5.

Таким образом, оптимизация энергетических потерь в инверторе с контролем порогового тока позволяет с помощью метода мягкой коммутации

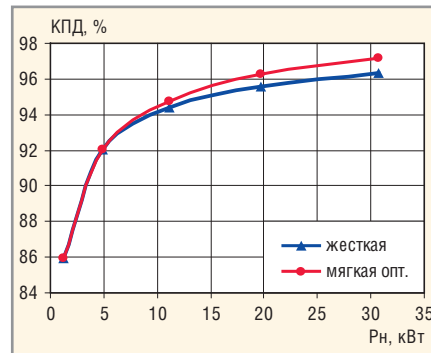


Рис. 5. Зависимость КПД схемы от выходной мощности нагрузки P_n при жёсткой и мягкой коммутации при слежении за пороговым током

получить более высокий КПД в полном диапазоне регулирования выходной мощности нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин И.П., Воронин П.А. Снижение энергии потерь в ключевых элементах преобразователей. Современная электроника. 2010. № 9.
2. Воронин И.П. Схема мягкой коммутации ключевых элементов трёхфазного инвертора напряжения. Вестник МЭИ. 2010. № 5.

