

ВЛИЯНИЕ ДКИН НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ПИТАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А.И. ФЕДОТОВ*, Р.В. КУЗНЕЦОВ*, Е.А. ФЕДОТОВ*, А.Н. ЛЕУХИН**

* Казанский государственный энергетический университет
** Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола

В статье рассматриваются возможности динамических компенсаторов искажений напряжения (ДКИН) по обеспечению требуемого уровня остаточного напряжения на промышленных нагрузках при коротких замыканиях во внешней системе электроснабжения. Предложена оценка их технической эффективности в этих режимах по величине граничной длины электропередачи.

Ключевые слова: электрические сети, система электроснабжения, остаточное напряжение, электропередача, качество электроэнергии, провал напряжения.

Эффективность применения ДКИН обычно обосновывается тем, что при коротких замыканиях (КЗ) в сетях внутреннего электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий для нагрузок, подключенных за ДКИН, можно обеспечить повышенный уровень остаточного напряжения, гарантирующий продолжение их работы [1, 2]. Накопительные элементы ДКИН обеспечивают кратковременное поддержание напряжения на нагрузке и при полной потере питания, но существенно увеличивают их стоимость. Ниже рассматривается возможность ДКИН без накопительных элементов: поддержание требуемого уровня напряжения у потребителей при кратковременных нарушениях электроснабжения на стороне внешнего электроснабжения, т.е. в сетях 35 – 110 – 220 кВ, когда провал напряжения проявляется на каждой секции распределительного устройства (РУ) 6 – 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП) [3-5], рис. 1.

Такие ДКИН не способны в полной мере обеспечить восстановление напряжения на подключенной нагрузке, поскольку обмотки управления питаются от общей сети. Для успешной работы при КЗ К1 во внутренней системе электроснабжения, рис. 1, достаточно подключения данной обмотки через питающее устройство к другой секции (через трансформаторы T_1 или T_2) по отношению к линии, на которой установлен ДКИН. В то же время при внешних КЗ вида К2, сопровождающихся провалом напряжения на обоих вводах ГПП, напряжение понизится на каждом из трансформаторов T_1 и T_2 . При самозапуске двигательной нагрузки напряжение также снижается на каждой секции РУ 6 – 10 кВ, причем наличие накопительных элементов ДКИН не имеет значения, т.к. их действие кратковременное. Однако влияние ДКИН на потребителя остается и в этом случае.

ЭДС, наводимая в продольной обмотке ДКИН, пропорциональна напряжению на стороне выпрямленного тока. В свою очередь, выпрямленное напряжение при полном открытии управляющих клапанов пропорционально напряжению питания. Таким образом, даже в условиях пониженного напряжения на секциях ДКИН обладает определенной регулировочной способностью. Определим границы технической возможности использования ДКИН в случаях внешних КЗ, сопровождающихся провалами напряжения во всей системе электроснабжения.

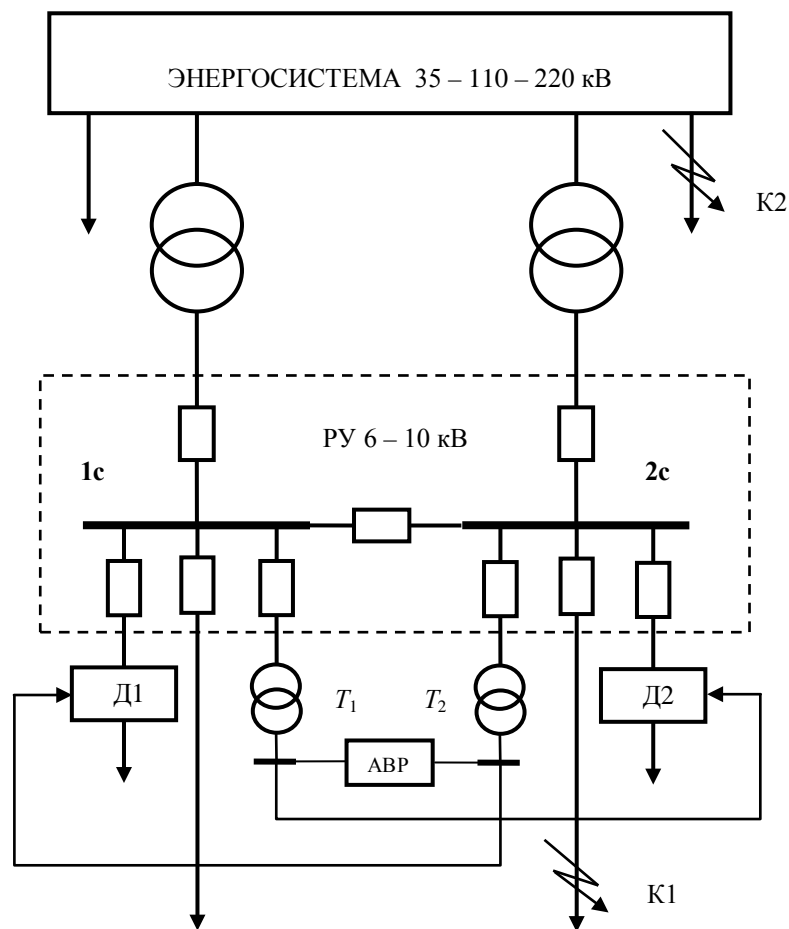


Рис. 1. Принципиальная схема ГПП с ДКИН

Принципиальной схеме на рис. 1 может быть сопоставлена схема замещения на рис. 2. Приняты следующие условные обозначения: ЭС – энергосистема; СОП – системообразующая подстанция; Н – нагрузка. На схеме замещения индексы «с, р, l» относятся, соответственно, к параметрам энергосистемы ЭС, к цепи питания нагрузки, и к линии, на которой произошло короткое замыкание на расстоянии l от подстанции ПС. Дополнительный индекс «s» означает сумму сопротивлений трансформатора и питающей линии. Рассмотрим установившийся режим провала напряжения на обеих секциях 1с и 2с ГПП, рис. 1. Как отмечалось выше, последний вызывается короткими замыканиями КЗ вида К2, происходящими на линиях электрически связанной сети.

Пренебрежём активными сопротивлениями в схеме замещения, рис. 2. Это увеличивает ток КЗ и дополнительно снижает уровень остаточного напряжения. Сформулируем задачу следующим образом: каково минимально возможное расстояние до места КЗ, при котором напряжение на нагрузке U_p , подключенной к ДКИН, еще не ниже минимально допустимого уровня $U_{доп}$? По известному току КЗ $I_{кc}$ на шинах ОРУ СОП (он заранее известен для каждой подстанции) можем определить величину сопротивления системы:

$$x_c = \frac{U_c}{I_{kc}},$$

где для упрощения промежуточных выкладок напряжение энергосистемы U_c принято напряжением его фазным значением.

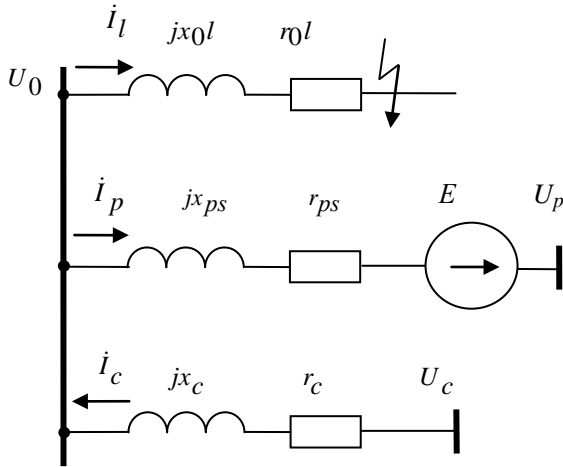


Рис. 2. Расчетная схема замещения

Находим ток КЗ в линии:

$$I_l = \frac{U_c}{x_c + x_0l} = \frac{U_c}{\frac{U_c}{I_{kc}} + x_0l}.$$

По сравнению с током КЗ можно пренебречь током нагрузки I_p , поэтому допустимо считать, что $I_l = I_c$.

Остаточное напряжение U_0 на шинах подстанции ПС будет несколько выше, чем напряжение на шинах РУ 6 – 10 кВ ГПП. Это можно при необходимости учесть увеличением уровня допустимого напряжения $U_{доп}$ на величину потерь напряжения в питающей линии и трансформаторе ГПП. В соответствии со схемой замещения (рис. 2) находим:

$$U_0 = I_l x_l = \frac{U_c}{\frac{U_c}{I_{kc}} + x_0l} x_0l. \quad (1)$$

Остаточное напряжение на нагрузке с учетом действия ДКИН равно

$$U_p = U_{\text{ВЫХ}} = U_0 + E = U_{\text{ВХ}} + E, \quad (2)$$

где E – максимальная ЭДС ДКИН при пониженном напряжении питания обмотки управления, которую можно записать в виде

$$E = kU_{\text{ВХ}}. \quad (3)$$

При номинальном напряжении на шинах подстанции

$$U_{\text{НОМ}} - U_{\text{ВХ}}^{\text{МИН}} = kU_{\text{НОМ}},$$

тогда

$$k = 1 - U_{\text{ВХ}}^{\text{МИН}} / U_{\text{НОМ}}. \quad (4)$$

На рис. 3 показаны внешние ДКИН при номинальном (1) и пониженном (2) напряжении питания управляющей обмотки.

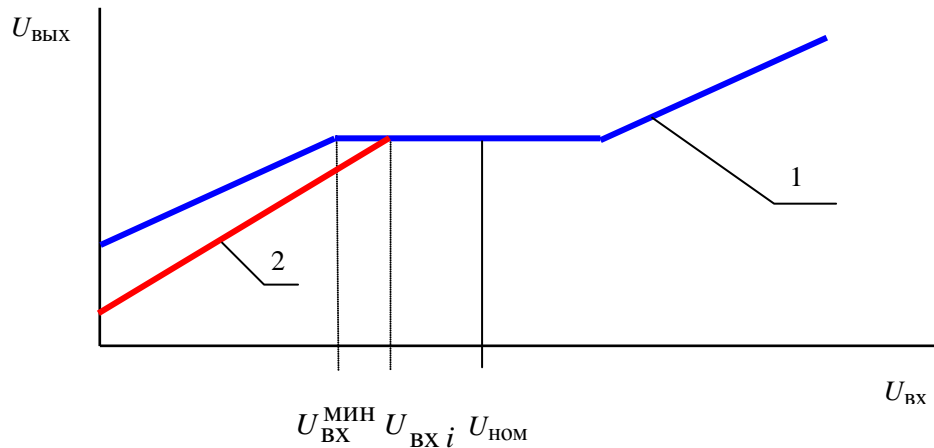


Рис. 3. Внешние характеристики ДКИН

При понижении напряжения на шинах подстанции точка $U_{\text{ВХ}}^{\text{МИН}}$ внешней характеристики 1 смещается вправо до точки $U_{\text{ВХ}i}$ (рис. 3). Горизонтальный участок внешней характеристики соответствует изменению ЭДС в пределах от $E_{\text{МАКС}}$ до $-E_{\text{МИН}}$. Граничная точка $U_{\text{ВХ}i}$ начального участка внешней характеристики, когда полностью открыты вентили питания управляющей обмотки, находится из условия

$$U_{\text{НОМ}} - U_{\text{ВХ}i} = kU_{\text{ВХ}i}. \quad (5)$$

Левая часть внешней характеристики ДКИН (рис. 3) описывается следующим выражением при подключении цепи питания обмотки управления ДКИН согласно рис. 1:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} + E = U_{\text{ВХ}} + kU_{\text{ВХ}} = (1 + k)U_{\text{ВХ}}. \quad (6)$$

Если системой АВР-0,4 кВ подключать питание обмотки управления ДКИН на выход собственного устройства, то закон изменения выходного напряжения следующий:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} + E = U_{\text{ВХ}} + kU_{\text{ВЫХ}}.$$

Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{1 - k}. \quad (7)$$

Отметим, что в численном виде выражения (6) и (7) отличаются не более, чем на несколько процентов.

Граничную длину электропередачи при внешних КЗ определяем из условия, что напряжение на нагрузке после ДКИН равно допустимому: $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ДОП}}$. Входным в формуле (6) является остаточное напряжение, определяемое по формуле (1). В результате получаем

$$U_{\text{ДОП}} = (1 + k) \frac{U_c}{\frac{U_c}{I_{kc}} + x_0 l_g},$$

откуда находим граничную длину электропередачи:

$$l_g = \frac{U_c}{x_0 I_{kc}} \times \frac{U_{\text{доп}}}{(1+k)U_c - U_{\text{доп}}} \quad (8)$$

Выполним сравнительные расчеты на примере ДКИН-S, для которого [1] $U_{\text{ВХ}}^{\text{МИН}} = 0,8U_{\text{НОМ}}$. Примем, что $U_c = 1,05U_{\text{НОМ}}$, $U_{\text{доп}} = 0,7U_{\text{НОМ}}$ и $x_0 = 0,4$ Ом/км. Тогда, в соответствии с формулой (4), $k=0,2$.

В соответствии с формулой (8) имеем:

$$l_g = \frac{1,05 \times 110 / \sqrt{3}}{0,4 I_{kc}} \times \frac{0,7}{1,05(1+0,2) - 0,7} = \frac{208}{I_{kc}}, \text{ км.} \quad (9)$$

Используя формулы (1) и (7), имеем:

$$l_g = \frac{U_c}{x_0 I_{kc}} \times \frac{U_{\text{доп}}}{U_c / (1-k) - U_{\text{доп}}} = \frac{190}{I_{kc}}, \text{ км.} \quad (10)$$

На рис. 4 зависимость (9) представлена графиком 2. График 1 соответствует отсутствию ДКИН. График 3 соответствует зависимости (10). Сравнение характеристик 1 и 3 показывает, что граничная длина электропередачи уменьшилась приблизительно в два раза, соответственно, в два раза уменьшится технологический ущерб от воздействия провалов напряжения на промышленных потребителях [5].

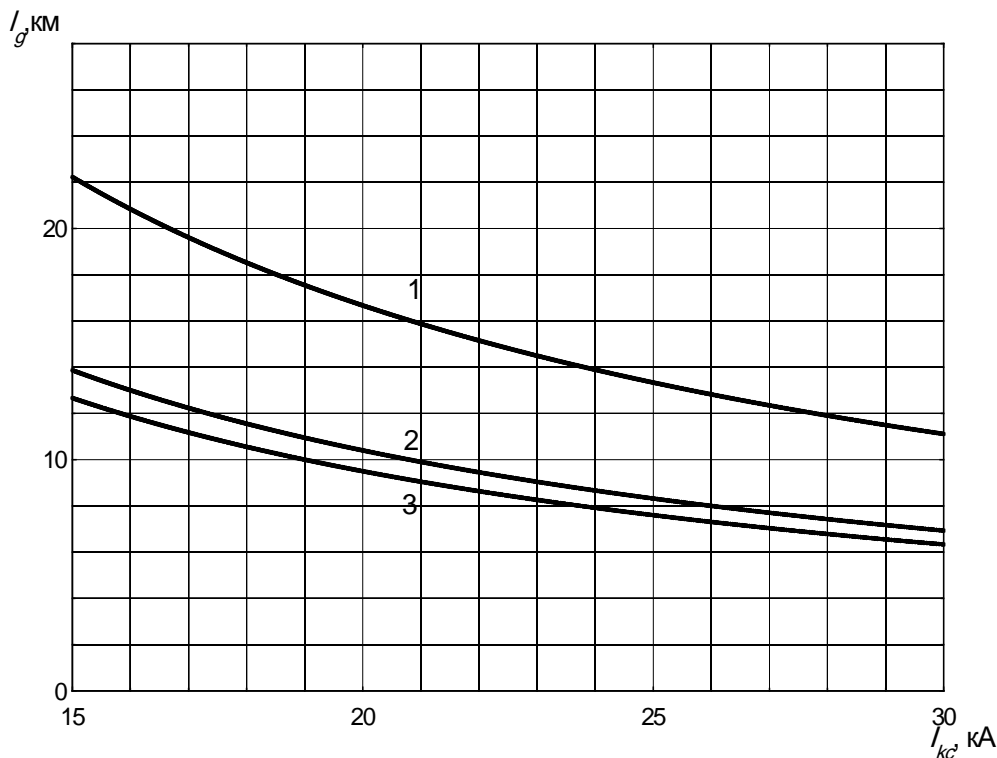


Рис. 4. Граничная длина электропередачи при установке ДКИН:
1 – $k=0$; 2 – $k=0,2$; 3 – $k=0,3$.

Выводы

Динамические компенсаторы искажений напряжения эффективно работают и при КЗ во внешней сети, сопровождающихся провалами напряжения на стороне

низшего номинального напряжения промышленных подстанций. Зная граничную длину электропередачи, можно рассчитать экономический эффект от применения ДКИН. Одним из возможных путей повышения уровня остаточного напряжения может быть введение дополнительного АВР, обеспечивающего переключение цепи питания обмотки управления ДКИН на его выход при общем провале напряжения на каждом вводе подстанции.

Литература

1. Пупин В.М. Устройства защиты от провалов напряжения. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. 100 с.
2. Применение динамических компенсаторов искажения напряжения с целью обеспечения надежности электроснабжения потребителей / О.Н. Ивкин, Э.А. Киреева, В.М. Пупин и др. // Главный энергетик. 2006. №1. С. 28-31.
3. Кузнецов Р.В. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 10. №2. С. 115-117.
4. Абдуллазянов Э.Ю., Чернова Н.В., Федотов А.И., Вагапов Г.В. Снижение провалов напряжения на основе использования токоограничивающих устройств // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. №3-4. С. 53-60.
5. Федотов А.И., Абдуллазянов Э.Ю., Марфин В.В. Оценка экономической эффективности мероприятий по ограничению кратковременных нарушений электроснабжения на промышленных потребителей с учетом влияния переходных процессов // Энергетика Татарстана. 2012. № 3. С. 42-45.

Поступила в редакцию

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: fed.ai@mail.ru.

Кузнецов Роман Викторович – аспирант кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: info@elprojekt.com.

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: evfedotov2008@mail.ru.

Леухин Анатолий Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, проректор Марийского государственного университета (МарГУ), г. Йошкар-Ола. E-mail: prk@marsu.ru.