

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Совершенствование за счет упреждающих функций

*Года Нудельман, к.т.н., действительный член АЭН РФ,
генеральный директор*

*Александр Булычев, д.т.н., профессор, заместитель генерального
директора по науке*

Микропроцессорные устройства релейной защиты (МП РЗ) обладают новым принципиально важным свойством, которого так не хватало в полной мере предшественникам (электромеханическим реле), – возможностью запоминать информацию (сигналы) и использовать ее в дальнейших операциях. Будущее – это следствие реальных произошедших событий. Поэтому на основе зарегистрированной и обработанной информации цифровые устройства РЗ способны сформировать аргументированное заключение не только о настоящем, но и о будущем состоянии контролируемого объекта. Для классических методов защиты характерна запаздывающая реакция на возникшее повреждение, обусловленная конечным временем измерения и оценивания параметров. Это приводит к необходимости выполнения экстренных операций по локализации повреждений, что неизбежно создает нежелательные возмущения для энергосистемы. К тому же провести детальную диагностику повреждения, как правило, при этом невозможно из-за дефицита времени. Экстраполирование и прогнозирование явлений в контролируемых объектах, мониторинг их эволюции и раннее (предаварийное) обнаружение потенциальных повреждений объекта позволяют сформировать предупреждение о приближении возможной аварии. В дополнение к симптомам, которые оцениваются количественно, иногда можно сформировать и эвристические, использующие качественную информацию от персонала, наблюдающего за контролируемым объектом. Это служит основой упреждающих функций РЗ.

РЕАЛИЗАЦИЯ УПРЕЖДАЮЩИХ ФУНКЦИЙ

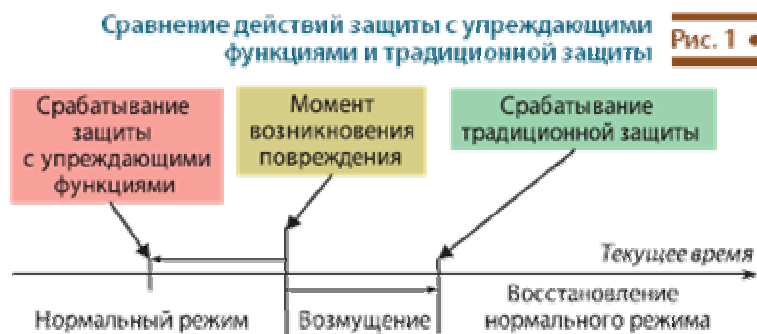
В соответствии с целевой установкой эффективность действия РЗ характеризуется ее способностью выявлять поврежденные элементы и производить переконфигурирование электроэнергетической системы в аварийных ситуациях для сохранения достойного качества электроснабжения исправных электроприемников.

Контролируемый устройством релейной защиты объект остается в работе до тех пор, пока его параметры находятся в пределах установленных допусков. В случае выхода одного или нескольких контролируемых параметров за пределы допусков объект выводится из работы и принимаются меры для восстановления его рабочего состояния [1].

Не все необходимые для РЗ параметры объекта доступны для измерения. Поэтому,

помимо использования результатов измерения входных воздействующих величин, общие алгоритмы контроля основываются также на косвенном оценивании необходимых ненаблюдаемых параметров.

Параметры объекта



Обобщенная схема функций системы контроля параметров и защиты, обладающей упреждающими свойствами **Рис. 2** •



Параметры, характеризующие состояние контролируемого объекта, входят в многомерную математическую модель, которая в линейном виде может быть представлена системой дифференциальных уравнений или одним векторно-матричным уравнением:

$$\frac{dy}{dt} = A(t)y(t) + N(t)q(t), y(t_0) = y_0.$$

где $A(t)$ и $N(t)$ – матрицы коэффициентов, определяющих свойства объекта и входных воздействий размерности, соответственно $(n \times n)$ и $(n \times m)$;
 $y(t)$ – n -мерный вектор переменных, представляющий собой совокупность отдельных переменных в пространстве состояния;
 $q(t)$ – m -мерный вектор воздействий на объект, включающий в себя совокупность управлений и возмущений;
 y_0 – вектор, характеризующий начальное состояние объекта.
 Контроль состояния объекта происходит на основании измерения наблюдаемых переменных на фоне аддитивных помех, образующих k -мерный вектор ($k \leq n$):

$$z(t) = C(t)y(t) + \xi(t),$$

где $C(t)$ – k -мерная матрица наблюдения;
 $\xi(t)$ – k -мерный вектор гауссовского белого шума.
 Параметры, содержащие информацию о состоянии объекта, но недоступные для измерения, вычисляются (восстанавливаются) по координатам вектора $z(t)$ с использованием известных аналитических связей переменных.

Контроль параметров

В устройствах РЗ реализуется общий допусковый принцип текущего контроля, когда обнаружение дефектов производится по результатам сравнения измеренных и вычисленных параметров с допустимыми значениями.

Непрерывный контроль с экстраполяцией и оцениванием параметров для будущего состояния позволяет реализовать упреждающую защиту объекта, которая обеспечивает раннее (предаварийное) обнаружение потенциальных повреждений (развивающихся дефектов) объекта и прогнозирование их эволюции.

Цель раннего обнаружения дефектов состоит в том, чтобы выиграть достаточный запас времени для детальной диагностики и выработки упреждающих мер, не требующих применения внезапных воздействий на объект. При этом не создается аварийной ситуации и локализация потенциального повреждения не сопровождается внезапными возмущениями энергосистемы (рис. 1). Формально, если отсчет начинать от момента возникновения повреждения, время срабатывания защиты с упреждающими функциями можно считать отрицательным.

По результатам наблюдений параметров на определенном промежутке времени проводится экстраполяция значений и на основе рекуррентного алгоритма вычисляется будущее значение параметра, характеризующего состояние объекта \hat{r} :

$$r(t_n + \tau) = \Pi[z(t_n), r(t_{n-1} + \tau)],$$

где t_n – последний момент наблюдения;

τ – время прогноза;

Π – оператор прогнозирования, определяемый из условия экстремума выбранного критерия.

Процедуры контроля параметров и выявления неисправностей могут быть весьма разнообразны. Можно выделить три важнейшие задачи:

- выявление аналитических и эвристических симптомов повреждения;
- диагностика неисправности;
- принятие решения о возможности дальнейшей работы контролируемого объекта.

Первая задача решается с использованием методов параметрической идентификации стохастических систем на основе количественных оценок параметров. В дополнение к симптомам, определяемым количественно, иногда можно сформировать и эвристические признаки, использующие качественную информацию от людей, наблюдающих за контролируемым объектом.

Вторая задача – диагностика – состоит в определении типа, размеров и местоположения неисправности.

Третья задача имеет логический характер. Она, как правило, решается с использованием теории принятия решений, путем выполнения приемлемых операций по управлению ЭЭС и алгоритмов оперативных переключений. Обобщенная схема функций системы контроля параметров и защиты, обладающей упреждающими свойствами, представлена на рис. 2.

Решаемые этой системой задачи защиты, по сути, связаны с определением нежелательных и запрещенных состояний объекта, а также с выполнением программы действий, направленных на поддержание нормального режима работы, предотвращение возможных аварийных ситуаций и восстановление нормального технического состояния контролируемого объекта.

Уровни системы защиты

Система защиты содержит несколько уровней:

1. Наблюдение (мониторинг). Измеряемые с помощью показывающих приборов (индикаторов) сигналы проверяются оператором на предмет выхода за допустимые границы. В случае отклонения сигналов от нормы оператор принимает решения и предпринимает соответствующие действия. Кроме этого, ведется общее наблюдение за контролируемым объектом. Наблюдение и осмотр человеком позволяют получить эвристические характеристические значения в виде шумов, запахов, вибрации, разрывов, а также общие оценки состояния с учетом истории объекта (мероприятия по обслуживанию, имевшие место неисправности, продолжительность эксплуатации, характер нагрузки и т.п. факторы из опыта работы).
2. Непрерывный контроль с оцениванием параметров, определяющих общее состояние объекта. На основе измеренных сигналов идентифицируются параметры объекта. Путем обнаружения отклонений их значений от нормальных генерируются симптомы дефектов, осуществляется детальная диагностика потенциальных повреждений и принимаются решения о том или ином упреждающем действии, исполняемом в течение сравнительно продолжительного времени (без применения экстренного отключения).

3. Основная защита традиционного типа. С помощью специальных измерительных преобразователей по определенным алгоритмам оцениваются сигналы, содержащие информацию о возможных повреждениях. При возникновении опасного для энергосистемы повреждения защита автоматически экстренно инициирует отделение поврежденного элемента от исправной части электрической системы, т.е. действует по традиционным алгоритмам.

Состояние любого элемента электрической системы определяется многими факторами, которые имеют сложные взаимные связи. Пусть некоторый интегральный параметр R отражает состояние контролируемого объекта. Его значения могут быть получены в определенные моменты времени путем приведения к единой базе значений параметров, полученных по паспортным данным, прямыми и косвенными методами измерений и экспертными оценками.

Причины повреждений и их анализ

Всё многообразие причин возникновения повреждений элементов ЭЭС можно разделить на две группы:

- первая группа – это процессы естественного износа (старения);
- вторая – сильные внешние воздействия дискретного типа, значительно превышающие обычные возмущения по интенсивности (пробой изоляции под действием грозových перенапряжений, механические повреждения изоляции и др.).

Дефекты, вызванные причинами первой группы, могут быть выявлены на ранних стадиях развития устройствами РЗ, обладающими упреждающими свойствами. Повреждения, инициированные причинами второй группы, безусловно, должны выявляться и локализоваться средствами РЗ традиционного типа.

Для качественного анализа работы упреждающей защиты (как первое приближение) можно отождествить интегральный параметр R с эквивалентным активным сопротивлением изоляции контролируемого объекта.

По одному этому параметру, допустимые значения которого регламентируются нормативными документами, можно судить о работоспособности контролируемой сети в целом, а для детальной диагностики повреждения – использовать и другие параметры [2].

Взгляд в будущее

В процессе эксплуатации сопротивление изоляции изменяется в соответствии с некоторой функцией времени $R_{из}(t)$. Значения этой функции измеряются и регистрируются в определенные моменты времени (рис. 3). В результате имеются значения функции $R_{из}(t_0)$, $R_{из}(t_1)$, $R_{из}(t_2)$... $R_{из}(t_n)$ на временном интервале T_1 от момента начала регистрации значений сопротивления изоляции (t_0) до момента регистрации последнего известного значения сопротивления изоляции (t_n). По известным значениям функции $R_{из}(t)$, используя методы экстраполяции, определяется значение функции $R_{из}(t)$ в будущий момент времени (t_{n+1}).

При большом разбросе зарегистрированных значений сопротивления изоляции для восстановления действительной функции времени в области известных значений используют методы интерполирования.

Например, строят сглаженную характеристику $R_{ИЗ}(t)$ [3].

Идеальным случаем интерполирования является адекватное описание функции $R_{ИЗ}(t)$ каким-либо аналитическим выражением.

Но ввиду сложности нахождения таких выражений по дискретным значениям функции целесообразно применять универсальную структуру аналитического выражения.

В общем случае на интервале T_1 (в области известных значений) функцию $R_{ИЗ}(t)$ можно представить многочленом вида [3]:

$$R_{ИЗ}(t) = \sum_{j=0}^m a_j f_j(t),$$

где a_j – постоянные коэффициенты;

f_j – известные простейшие функции, например: $f_0(t) = 1$; $f_1(t) = t$; $f_2(t) = t^2$ и т.п.

Тогда базовый полином можно представить так:

$$R_{ИЗ}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots$$

Например, в результате измерения сопротивления изоляции в моменты времени t_{n-1} и t_n получены соответствующие значения сопротивления изоляции $R_{ИЗ(n-1)}$ и $R_{ИЗ(n)}$. Отношение $(R_{ИЗ(n)} - R_{ИЗ(n-1)}) / (t_n - t_{n-1}) = a_1$ есть средняя скорость изменения сопротивления изоляции на интервале времени от t_{n-1} до t_n . В этом интервале:

$$R_{ИЗ}(t) = R_{ИЗ(n-1)} + a_1 t.$$

Если предположить, что на следующем интервале времени (будущем) скорость изменения сопротивления изоляции останется неизменной, то можно определить будущее значение сопротивления изоляции через временной интервал $T_2 = t_{n+1} - t_n$:

$$R_{ИЗ(n+1)} = R_{ИЗ(n)} + a_1 (t_{n+1} - t_n),$$

где $R_{ИЗ(n)}$ – последнее из зарегистрированных значение сопротивления изоляции в момент t_n ;

$R_{ИЗ(n+1)}$ – будущее (прогнозируемое) значение сопротивления изоляции в момент t_{n+1} .

На рис. 4 показана графическая интерпретация аналитического прогнозирования сопротивления изоляции с использованием линейной функции $R_{ИЗ(n+1)} = R_{ИЗ(n)} + a_1 (t_{n+1} - t_n)$ и определения остаточного ресурса изоляции.

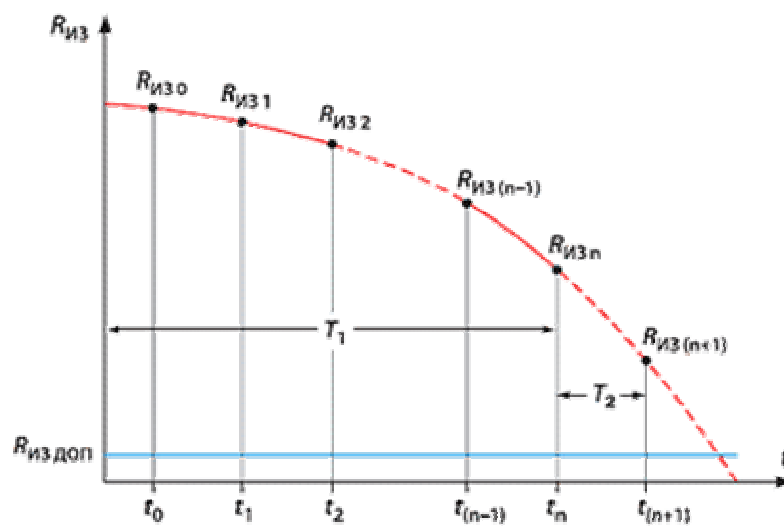
Остаточный ресурс изоляции ($t_{ОР}$) определяется как интервал времени, в течение

которого значение сопротивления изоляции достигает предельно допустимого уровня:

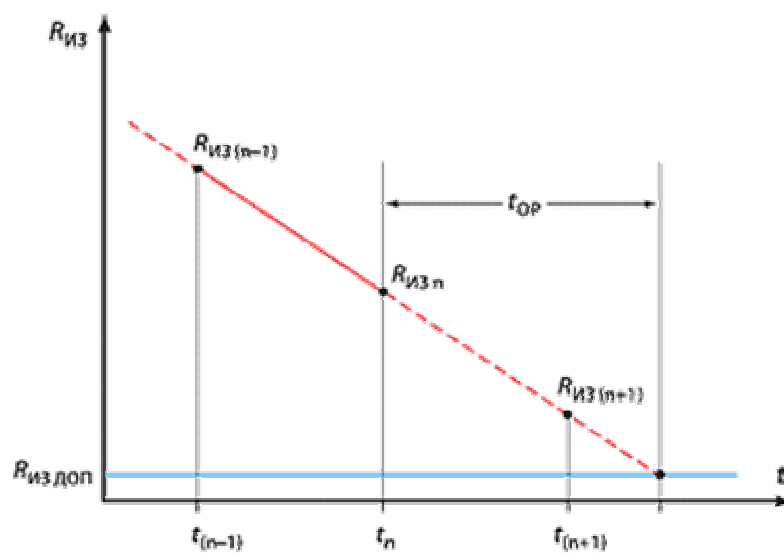
$$t_{OP} = (R_{ИЗ доп} - R_{ИЗ(t)}) / a_1,$$

где $R_{ИЗ доп}$ – допустимое значение сопротивления изоляции.

Сопротивление изоляции в зависимости от времени **Рис. 3**



Графическая интерпретация аналитического прогнозирования сопротивления изоляции **Рис. 4**



Таким образом, обслуживающий персонал имеет резерв времени в пределах

интервала прогнозирования t_{OP} , для того чтобы вывести из работы контролируемый защитой элемент электрической сети и обеспечить резервным питанием потребителей еще до возникновения замыкания, не прибегая к экстренным отключениям.

Для выполнения более точного прогнозирования сопротивления изоляции следует воспользоваться более точной аппроксимирующей функцией $R_{ИЗ}(t)$ в области известных и прогнозируемых значений сопротивления изоляции, учитывающей большее число зарегистрированных значений и большую продолжительность наблюдений. Кроме этого, чем меньше отношение интервала прогнозирования и интервала известных значений (T_2/T_1), тем выше точность прогноза. С целью повышения точности прогнозирования могут быть использованы экстраполяционные полиномы Лагранжа, Ньютона и математический аппарат регрессионного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция создания средств РЗ, обладающих упреждающими функциями, уже сегодня реализуется и может быть применена в полной мере на базе используемых в цифровых системах РЗ современных высокоэффективных средств обработки электрических сигналов.

Эти возможности обеспечиваются благодаря применению точных измерений, осуществляемых устройствами, использованию дополнительной информации о контролируемом объекте и окружающей среде, автоматизации процесса определения параметров срабатывания и контроля функционирования в процессе работы, регистрации параметров аномальных режимов с целью последующего анализа и принятия решения о том или ином упреждающем действии защиты. Благодаря новому свойству РЗ создается резерв времени в пределах интервала прогнозирования, для того чтобы вывести из работы контролируемый защитой объект ЭЭС, не прибегая к экстренным отключениям. Появляется возможность обеспечить потребителей электрической энергией по резервным каналам, а при локализации потенциального повреждения избежать внезапных возмущений ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976. 560 с.
2. Булычев А.В., Гуляев В.А., Дежнев В.А. Способ защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю. Патент РФ на изобретение № 2304832, Н02Н 3/16. Бюл. № 23, 2007.
3. Саркисян С.А., Каспин В.И., Лисичкин В.А., Минаев Э.С., Пасечник Г.С. Теория прогнозирования и принятия решений / под ред. С.А.Саркисяна. М.: Высшая школа, 1977. 352 с.