

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ ПОВТОРНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ

Э. К. Алгазинов, М. Г. Матвеев, Н. А. Тюкачев, А. М. Ховив

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 31.10.2011 г.

Аннотация. Предлагается модель управления автоматическим повторным включением электроэнергии при устранимых аварийных повреждениях. Модель представлена в виде конечного автомата работающего в реальном масштабе времени и обеспечивающего сокращение времени выработки управляющего воздействия за счет специального представления функции переходов и функции выхода.

Ключевые слова: модель управления, конечный автомат, электрическая подстанция.

Annotation. A model of management of the automatic reclosing of electricity at avoidable accident damage. The model presented in the form of a finite state machine running in real time and providing a reduction in the time to develop a control action by means of a special representation of functions of transitions and functions of the output.

Keywords: management model, a finite state machine, electric substation.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации воздушных линий электропередачи и оборудования подстанций могут возникать аварийные повреждения, приводящие к коротким замыканиям (КЗ). В результате происходит глубокое снижение напряжения, отключение потребителей электроэнергии с соответствующими негативными последствиями. В большинстве случаев развитие аварии может быть предотвращено быстрым отключением поврежденных электроустановок защитной автоматикой, самоустранением КЗ и повторным включением электроустановки с помощью системы автоматического повторного включения (АПВ).

Критериями эффективности функционирования системы АПВ являются ее надежность и скорость срабатывания [1]. Под надежностью понимается адекватная реакция АПВ на текущую ситуацию. Существенную роль в процессе управления играет своевременное и досто-

верное информирование персонала о признаках аварийной ситуации и ее диагностики. Очевидно, что уровень надежности будет зависеть от полноты информации об аварийной ситуации и качества ее диагностики.

Современное исполнение системы АПВ базируется на микропроцессорных устройствах, обладающих лучшими значениями критериальных показателей по сравнению с электроавтоматикой, однако зачастую не обеспечивающих требуемого уровня надежности и скорости срабатывания [2, 3]. В значительной степени повышение уровня эффективности АПВ будет зависеть от методов и алгоритмов автоматического управления. Логика современных цифровых защит в настоящее время строится, в основном, путем реализации алгоритмов — аналогов существующих реле предыдущих поколений. И хотя эти алгоритмы надежны и проверены временем, к сожалению, не всегда в полной мере функциональны и оптимальны [3]. Применение цифровой автоматикой дает возможность расширить функциональность и повысить надежность управления. Однако такой подход обуславливает объективное противоречие с критерием быстрого действия — скорость срабатывания АПВ снижается на время обработки дополнительной информации.

© Алгазинов Э. К., Матвеев М. Г., Тюкачев Н. А., Ховив А. М., 2011

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК 16.516.11.6123)

Цель предлагаемого исследования – сокращение времени обработки информации в процессе выработки управляющего воздействия путем выбора рационального логического алгоритма на основе исследования моделей управления.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОВТОРНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Моделирование систем дискретного управления, к которым относятся системы АПВ, обычно осуществляется на основе той или иной формализации логических правил управления. В основе построения правил управления лежат соответствующие требования, например, в [4] приводится набор основных требований к АПВ:

- Алгоритмы АПВ должны приходить в действие при аварийном отключении выключателя, находившегося в работе; в некоторых случаях АПВ должны удовлетворять дополнительным требованиям, разрешающим пуск АПВ: наличие или отсутствие напряжения, наличие синхронизма, восстановление частоты и т.п.

- Алгоритмы АПВ не должны приходить в действие при оперативном отключении выключателя персоналом, а также в случаях, когда выключатель отключается релейной защитой сразу после его включения персоналом (наличие устойчивого повреждения). Также должна предусматриваться возможность запрета действия АПВ при срабатывании отдельных защит (сработала газовая или дифференциальная защита трансформатора, сработала дифференциальная защита шин и т.п.).

- Алгоритмы АПВ должны обеспечивать определенное количество повторных включений, то есть действовать с заданной кратностью.

- Время действия, как правило, должно быть минимально возможным, чтобы обеспечить быстрое восстановление подачи напряжения потребителям (например, не более 0,3–0,5 сек). Вместе с тем в некоторых случаях, когда наиболее вероятны повреждения, вызванные набросами и касаниями проводов, целесообразно принимать временные задержки срабатывания АПВ до нескольких секунд.

- Алгоритмы АПВ должны обеспечивать автоматический возврат в исходное положение готовности к новому действию после включения в работу выключателей.

Приведенные требования являются лишь основными и обязательно дополняются многообразными требованиями конкретной ситуации.

Формализацию требований к устройствам и алгоритмам противоаварийного управления удобно представлять в виде продукционных правил [5]

$$(i); Q; P; A \Rightarrow B; N, \quad (1)$$

где i – имя продукции, описывающей устройства автоматического управления; Q – сфера применения продукции; P – условие применимости ядра продукции, если $P = 1$, ядро активизируется; $A \Rightarrow B$ – ядро продукции (A описывает некоторое условие, необходимое для того, чтобы можно было совершить действие B); N – постусловие продукции (при условии, что ядро реализовалось).

Ядро продукции представляется в виде

$$(A_1, A_2, \dots, A_n) \Rightarrow (B_1, B_2, \dots, B_m), \quad (2)$$

где A_i и B_i – продукционные условия и продукционные действия соответственно, соединенные логическими связками и определяемые требованиями к управлению.

В свою очередь продукционные условия в выражении (2) могут быть представлены в виде предикатных функций

$$P_i(k, x) \in \{0, 1\},$$

где x – вектор измерений, произведенных на объекте управления; k – уставки алгоритма управления.

2. КОНЕЧНОАВТОМАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

Пусть текущее состояние объекта управления, представляющего собой некоторую совокупность электротехнического оборудования, может быть представлено множеством высказываний типа: «напряжение в линии соответствует номинальному уровню», «конкретный выключатель выключен», «температура находится в допустимых пределах» и т.п. Истинность или ложность этих высказываний определяется по результатам измерений, производимых с определенной цикличностью, и записывается в виде соответствующих предикатных функций

$$P_i(x(t), c) \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

где $x(t)$ – результат измерения в дискретный момент времени t ; c – уставки управления; n – количество проверяемых условий. Предикатные функции (3) показывают выполнение

условий, сформулированных в требованиях к АПВ. В общем случае, текущее состояние объекта управления будет определяться не только результатами текущих измерений выполнения условий, но и предыдущими состояниями объекта. Множество возможных состояний объекта обозначим $\{S_i^o\}$, тогда конкретное предыдущее состояние будет идентифицироваться предикатной функцией

$$P_j(x(t); S^o(t-1)) \in \{0, 1\}. \quad (4)$$

Текущее состояние объекта $S^o(t)$ можно задать последовательностью значений предикатных функций (3) и (4), соответствующих продукционным условиям A_i . С помощью логического выражения

$$A = P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_n \quad (5)$$

формируется двоичное число разрядностью n , однозначно соответствующее посылке P продукции (2).

Продукционное действие B_i представляет собой сигнал инициализации определенной микропрограммы, включения или отключения коммутационной аппаратуры, реализации временной задержки и т.п., следствием чего являются изменения значений переменных $x(t+1)$ и формирование состояния $S^o(t+1)$.

Адекватным инструментом реализации моделей (1–4) могут выступать микропрограммные автоматы (МПА) [6]. МПА – управляющие автоматы (УА), формирующие последовательности сигналов, инициирующих выполнение микропрограмм в операционных автоматах (ОА), рассматриваемых как формализованное отображение объекта управления. Схема взаимодействия управляющего и операционного автоматов показана на рис. 1.

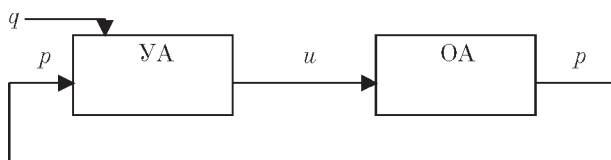


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия управляющего и операционного автоматов

На рис. 1 приняты следующие обозначения: u – вектор управляющих воздействий; p – вектор, характеризующий выход объекта управления и одновременно, являющийся входом управляющего автомата; q – вектор внешних воздействий, отображающий лишь часть взаи-

модействия системы с внешней средой – изменение уставок и начального состояния системы. Операционный автомат реализуется электрическими схемами объекта и схемами электроавтоматики.

Для задач АПВ управляющий автомат может быть представлен автоматом Мура [6]:

$$S^o(t+1) = \delta(x(t), S^o(t)); \quad (6)$$

$$u(t+1) = \eta(S^o(t+1)). \quad (7)$$

Функция переходов $\delta(\cdot)$ задается на основе выражений (3–5). Выход $u(t)$ представляет собой управляющее действие B_i . Множество допустимых состояний $\{S_i^o\}$ задается матрицей комбинаций значений компонент бинарного вектора (5) – M . В общем случае размерность этой матрицы $2^n \times n$. В реальных ситуациях размерность $m \times n$ матрицы существенно меньше, так как практически реализуемых ситуаций меньше теоретических, а значит число строк m меньше максимально возможного – 2^n . Автоматы с матрицей M , у которой $m < 2^n$, будем называть не полностью определенными. Каждому состоянию (строке) матрицы M в однозначное соответствие ставится компонент выходного вектора u . Функция выходов η задается с помощью логических операций установления эквивалентности текущего состояния и строки матрицы M .

Поскольку управление осуществляется в реальном масштабе времени, к управляющему автомату предъявляются жесткие требования по времени срабатывания. Суммарное время на реализацию опроса датчиков, функций δ и η , срабатывания ОА не должно превышать такта квантования времени, которое в системах АПВ может составлять доли секунды. Значительную часть времени занимает реализация функции выходов η . Сокращение этого времени можно достичь уменьшением размерности матрицы M и максимальным упрощением логических операций идентификации текущей строки этой матрицы.

Анализ требований к АПВ, в виде логических условий (3) и не полная определенность управляющего автомата, позволяют выбрать рациональную методику построения системы предикатов (5) в виде линейно-древовидной структуры, показанной на рис. 2.

В этом случае матрица M примет вид треугольной матрицы размерности $n \times n$:

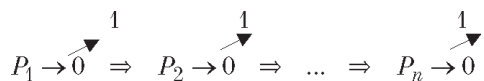


Рис. 2. Линейно-древовидная структура

$$\begin{pmatrix} 1 & - & - & - \\ 0 & 1 & - & - \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Полученный вид матрицы M позволяет сократить время реализации функции выходов, то есть время определения управляющего воздействия. Действительно, алгоритм идентификации состояния и выбора управляющего воздействия реализуется в простом цикле:

1. $i = 1$;
2. если (P_i) , то P_i и конец работы, иначе переход к 3;
3. $i = i + 1$, переход к 2.

Максимальное число срабатываний цикла равно числу строк матрицы M , т.е. n .

Формирование и вычисление предикатных функций P_i осуществляется в рамках операционного автомата.

3. ПРИМЕР МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

Пусть состояние объекта защиты характеризуется совокупностью логических высказы-

ваний (условий), определяемой системой предикатных функций с линейно-древовидной структурой. Такая структура предполагает, что каждое последующее условие порождается предыдущим. Пример такой структуры условий показан в таблице 1.

Структура условий задает матрицу M и вектор выхода (управление) в виде

$$\begin{pmatrix} 1 & - & - & - & - & - \\ 0 & 1 & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 1 & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 1 & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{pmatrix}$$

Каждой i -й строке матрицы M соответствует компонент вектора управления u_i . В примере $u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = 0$ – АПВ не включается, $u_6 = 1$ – включение АПВ.

Рассмотрим формирование и вычисление выхода ОА и входа УА, то есть вектора предикатных функций P_i . Обозначим:

- x_1 – напряжение в линии после выключателя (1 – есть, 0 – нет);
- x_2 – напряжение в линии до выключателя (1 – есть, 0 – нет);
- x_3 – признак отключения выключателя персоналом (1 – персоналом; 0 – не персоналом);

Таблица 1

Структура условий выполнения требований к АПВ

Обозначение предиката	Название предиката	Значение предиката	Комментарий
P_1	Состояние выключателя	0 – отключен 1 – включен	Если выключатель включен $P_1=1$, повторного включения не требуется. u_1 – АПВ не включается.
P_2	Кто отключил выключатель	0 – не персон 1 – персонал	Если $P_1=0$ и $P_2=1$, то выключатель отключил персонал, u_2 – АПВ не включается.
P_3	Срабатывание реле спецзащиты	0 – не сработ 1 – сработала	Если $P_1=0$ и $P_2=0$, $P_3=1$, то u_3 – АПВ не включается.
P_4	Превышение допустимой кратности срабатывания АПВ	0 – не прев 1 – превышена	Если $P_1=0$ и $P_2=0$, $P_3=0$, $P_4=1$, то u_4 – АПВ не включается.
P_5	Граница временной задержки не превышена	0 – превышена 1 – не превыш	Если $P_1=0$ и $P_2=0$, $P_3=0$, $P_4=0$, $P_5=1$, то u_5 – АПВ не включается.
P_6	Условие включения АПВ	0 – не выполн 1 – выполнено	Если $P_1=0$ и $P_2=0$, $P_3=0$, $P_4=0$, $P_5=0$, $P_6=1$, то u_6 – АПВ включается.

x_4 – признак срабатывания реле спецзащиты (1 – сработала спецзащита; 0 – выключатель отключен по другой причине);

x_5 – признак срабатывания реле спецзащиты (1 – сработала спецзащита; 0 – выключатель отключен по другой причине);

i – значение счетчика временных тактов;

k_1 – предельное значение кратности срабатывания;

k_2 – предельное значение тактов временной задержки.

Предикатные функции принимают вид:

– выключатель отключен, если напряжение до него есть, а после выключателя – нет, то есть предикат P_1 имеет вид логической функции – $x_1 \rightarrow x_2$.

– $P_2 = x_3$.

– $P_3 = x_4 \wedge x_5$.

– $P_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } i \geq k_1, \text{ в } OA \ i = 0; \\ 0, & \text{если } i < k_1, \text{ в } OA \ i = i + 1. \end{cases}$

– $P_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } i < k_2, \text{ в } OA \ i = i + 1; \\ 0, & \text{если } i \geq k_2, \text{ в } OA \ i = 0. \end{cases}$

– $P_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } (P_1 = 0) \wedge (P_2 = 0) \wedge \\ & \wedge (P_3 = 0) \wedge (P_4 = 0) \wedge (P_5 = 0), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в работе автоматные модели управления автоматическим повторным включением питания подстанций и электросетей позволяет, в случае возможности представления

Алгазинов Э. К. – д. ф.-м. н., профессор кафедры Информационных систем ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-724. Email: algazinov@cs.vsu.ru

Матвеев М.Г. – д. ф.-м. н., профессор кафедры Программирования и информационных технологий ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-470. Email: mgmatveev@yandex.ru

Тюкачев Н.А. – к.ф.-м. н., доцент кафедры Программирования и информационных технологий ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-470. Email: nik@cs.vsu.ru

Ховив А.М. – д.ф.-м.н., д.хим.н., профессор, проректор по научной работе ВГУ. Тел. (4732)208-445. Email: kcmf@chem.vsu.ru

требований к АПВ в виде линейно-древовидной структуры, существенно сократить время обработки информации и выработки управляющего воздействия. Этот результат важен в условиях реального времени с жесткими требованиями по быстрдействию срабатывания управляющего устройства.

Представление системы управления в виде управляющего и операционного автоматов дает возможность построения имитационной модели системы управления при замене объекта управления его модельным описанием в виде операционного автомата.

Следует отметить, что предложенные модели могут быть использованы и для других систем противоаварийной дискретной автоматики электрических подстанций, например, для системы автоматического включения резервного питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие технические требования к программно-техническим комплексам для АСУ ТП тепловых электростанций. РД 153-34.1-35.127-2002, Москва. 2002.

2. *Беллев А., Широков В., Емельянцева А.* Цифровые терминалы РЗА. Опыт адаптации к российским условиям. Новости электротехники, №1(43) 2007.

3. *Гринев Н.В.* Алгоритм встречно-направленной защиты шин. Рынок электротехники, №1, 2009.

4. *Беркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А.* Автоматика энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

5. *Левыкин В.М., Кудрявцева М.С.* Модели требований к устройствам автоматического управления и защиты трансформаторного оборудования. Сб. науч. трудов Харьковского университета радиоэлектроники, выпуск 3(15), 2007.

6. *Макоха А.Н., Сахнюк П.А., Червяков Н.И.* Дискретная математика. – М.: Физматлит, 2005.

Algazinov E. K. – doctor of Physics-math. Sciences, Professor of the dept. of the Information Systems, VSU, Tel. (4732)208-724

Matveev M.G. – doctor of Physics-math. Sciences, Professor of the dept. of the Programming and Information Systems, VSU, Tel. (4732)208-470. Email: mgmatveev@yandex.ru

Tyukachev N.A. – Candidat of Physics-math. Sciences, Associate Professor, the dept. of the Programming and Information Technologies, VSU. Tel. (4732)208-470. E-mail: nik@cs.vsu.ru

Khoviv A. M. – doctor of Physics-math. Sciences, doctor of chemical Sciences, vice rector for research VSU. Tel. (4732)208-445. E-mail: kcmf@chem.vsu.ru