

JAHRESBERICHT 2000

Zu den Arbeiten gemäss Verfügung 78644

Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen – Phase 2

Zusammenfassung

In Phase 1 wurde die energiekenlinienbasierte PBM an einer ersten Referenzanlage mit der Charakteristik eines typischen Neubauobjekts während zwei Jahren erprobt. Die modellbasierte PBM wurde parallel dazu durch Simulationen an der ETHZ erprobt. Zusätzlich konnte die modellbasierte PBM im Rahmen des Projekts «Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3» an einer anderen Referenzanlage während einer Woche erprobt werden.

In Phase 2 soll nun die Wissensbasis in Zusammenarbeit mit zwei Industriepartnern verbreitert werden. Dazu sollen auf Basis handelsüblicher Geräte einige Regler mit den beiden Algorithmen für die energiekenlinienbasierte und die modellbasierte PBM programmiert und an einer weiteren Referenzanlage mit der Charakteristik eines typischen Sanierungsobjekts erprobt werden.

Ebenso wichtig wie die Regler-Erprobung ist die Gewinnung eines Datensatzes für die Emulation eines fiktiven Sanierungsobjekts auf dem ETHZ-Wärmepumpenprüfstand. Auf diesem Prüfstand sind weitere Reglererprobungen in einer späteren Phase 3 vorgesehen.

Zunächst wurde aufgrund einer ausführlichen Evaluation ein Sanierungsobjekt als Referenzanlage ausgewählt und mit einem Mess- und Datenaufzeichnungssystem ausgerüstet. Die Bestimmung der Anlageparameter erfolgt nun bis Ende 2000 mit der bestehenden Wärmepumpe und der bestehenden witterungsgeführten Rücklaufftemperaturregelung.

Parallel dazu erfolgt bis Ende 2000 die Implementierung der beiden Algorithmen für die energiekenlinienbasierte und die modellbasierte PBM in zwei Wärmepumpenregeler. Anfangs Januar 2001 (Woche 2) wird die neue Wärmepumpe in der Referenzanlage installiert werden. Die Anlage wird dann nach einer kurzen Einregulierungsphase für die Erprobung der beiden PBM-Regler zur Verfügung stehen.

Dauer des Projekts: 01.08.2000-31.08.2001

Beitragsempfänger: Arbeitsgemeinschaft Gabathuler/ETHZ

Berichtersteller: H. R. Gabathuler

**Adresse: Gabathuler AG
Kirchgasse 23
8253 Diessenhofen**

**Telefon: 052 / 654 16 50
e-mail: gabathuler.ag@bluewin.ch**

Projektziele 2000

Ausgangslage

In Phase 1 des vorliegenden Projekts wurden erste Untersuchungen zu zwei Regelstrategien durchgeführt:

- Die energiekennlinienbasierte PBM wurde an einem typischen Neubauobjekt mit trägem Wärmeabgabesystem (nass verlegte Fussbodenheizung) während zwei Jahren erprobt; sie lief völlig problemlos und der Sollwert der Raumtemperatur konnte immer ohne nennenswerte Abweichungen eingehalten werden
- Die modellbasierte PBM wurde durch Simulationen an der ETHZ erprobt und lieferte ebenfalls erfolgsversprechende Resultate; zusätzlich konnte die modellbasierte PBM im Rahmen des Projekts «Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3» an einer anderen Referenzanlage erfolgreich erprobt werden, allerdings nur während einer Woche

Zwei namhafte Firmen hatten aufgrund der obgenannten Resultate grosses Interesse an den neuen Regelstrategien bekundet und waren bereit, in Phase 2 an deren weiteren Erprobung mitzuwirken:

- Satag Thermotechnik AG, Arbon (Unternehmen der Viessmann Gruppe)
- Siemens Building Technologies (Europe) AG, Landis & Staefa Division, Zug

Geplante Arbeiten

Phase 2 dauert vom 1.8.2000 bis 31.8.2001. Durch die beiden Industriepartner sollen zunächst auf Basis handelsüblicher Geräte einige Regler mit den neuen Regelstrategien programmiert und zur Erprobung zur Verfügung gestellt werden. Die Erprobung der Regelstrategien soll dann auf zwei Ebenen erfolgen:

- In der laufenden Phase 2 auf einer Referenzanlage mit der Charakteristik eines typischen Sanierungsobjekts: Die beiden Regelstrategien sollen so in die Referenzanlage implementiert werden, dass sie alternativ gefahren werden können
- In einer späteren Phase 3 auf dem ETHZ-Prüfstand: Weitere Erprobung der Regelstrategien auf dem im Bau befindlichen Prüfstand, der die Emulation eines beliebigen (fiktiven) Hauses für eine real am Prüfstand vorhandene Sole/Wasser-Wärmepumpe erlauben wird

Im Jahr 2000 sollen folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Evaluation der Referenzanlage
- Ausrüstung der Referenzanlage mit einem unabhängigen Mess- und –Datenaufzeichnungssystem
- Messtechnische Bestimmung der Anlageparameter mit der bestehenden Wärmepumpe und der bestehenden witterungsgeführten Rücklaufftemperaturregelung
- Definition der Algorithmen energiekennlinienbasierte PBM
- Definition der Algorithmen modellbasierte PBM
- Implementierung beider Algorithmen in zwei Wärmepumpenregler durch Satag
- Implementierung des energiekennlinienbasierten Algorithmus in einen Regler durch Siemens

2000 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Referenzanlage

Es lagen zwei typische Sanierungsobjekte vor, die als Referenzanlagen in Frage kamen. Aufgrund einer ausführlichen Evaluation wurde schliesslich die Anlage «Winterthur» als Referenzanlage ausgewählt, weil diese den Anforderungen am besten entsprach:

- Typisches Sanierungsobjekt (Wärmepumpenersatz)
- Häufig vorkommender EFH-Typ
- Luft/Wasser-Wärmepumpe (Referenzanlage in Phase 1 war eine Sole/Wasser-Wärmepumpe)
- Hoher Heizkörperanteil, separater Wärmezähler für Heizkörper möglich
- Grosse Fensterflächen mit Süd-Orientierung, d. h. grössere Störenergie bei eher kleinerem Heizenergiebedarf (gute Wärmedämmung)
- Grosses Interesse des Bauherrn und Bereitschaft zur Mitarbeit

Am 13.11.2000 wurde die Referenzanlage mit einem Mess- und Datenaufzeichnungssystem ausgerüstet. Die Bestimmung der Anlageparameter erfolgt nun bis Ende 2000 mit der bestehenden Wärmepumpe und der bestehenden witterungsgeführten Rücklaufftemperaturregelung. Erste Resultate wurden bereits zur optimalen Auslegung der neuen Wärmepumpe verwendet.

Energiekennlinienbasierte PBM

Mit Datum vom 10.11.2000 wurde eine Spezifikation zur energiekenlinienbasierten PBM zuhanden der beiden Industriepartner erstellt. Die Spezifikation besteht aus einer verbalen Beschreibung und aus einem EXCEL-File mit den detaillierten Berechnungsgrundlagen und Verknüpfungen. Die Spezifikation gilt für eine einstufige Luft/Wasser-Wärmepumpe mit fixen Hoch-/Niedertarifzeiten, wie sie auf der Referenzanlage vorliegt. Für die Erprobung auf dem ETHZ-Prüfstand sind Anpassungen notwendig.

Modellbasierte PBM

Der bis jetzt in MATLAB/Simulink programmierte Regelalgorithmus für die modellbasierte PBM musste in C umgeschrieben werden. So kann das entstehende Reglermodul in die bestehende Reglerumgebung von Satag integriert werden und die schon vorhandenen Logik- und Sicherheitsbausteine ausnützen. Erste Kompatibilitätstests zwischen dem an der ETHZ geschriebenen Modul und der bei Satag vorhandenen Entwicklungsumgebung wurden erfolgreich durchgeführt.

Das Regelmodul besteht aus vier Hauptteilen: LQ-MPC (Modellbasierter prädiktiver Regler mit LQ-Folgeregelung), Beobachter, Prädiktion und Pulsbreitenmodulation.

Der zentrale Teil ist der in Phase 1 des Projektes entwickelte LQ-MPC. Dabei wurde das Gütekriterium so modifiziert, dass der absolute Stromverbrauch bestraft wird. In Phase 1 wurde noch die Differenz zwischen dem optimierten Wärmebedarf und dem zur aktuellen Aussenlufttemperatur gehörenden statischen Wärmebedarf für die Optimierung verwendet. Neu werden der COP der Wärmepumpe, die Sperrzeiten und die Tarifstruktur in der Optimierung berücksichtigt. Dabei wird der zukünftige COP anhand des prädiktierten Verlaufes der Aussenlufttemperatur und der Herstellerdaten bestimmt. Durch Berücksichtigung dieser Daten kann die Heizleistung bezüglich Energie und Kosten optimiert werden, ohne dass der Wärmekomfort beeinträchtigt wird. Der Ausgang des LQ-MPC ist die während der nächsten Periodendauer optimale thermische Energie, welcher dem Gebäude zugeführt werden muss.

Da der LQ-MPC alle im Modell vorhandenen Zustandsgrößen (Rücklauf-, Boden- und Raumtemperatur) benötigt, aber nur die Rücklaufftemperatur gemessen wird, muss ein Beobachter eingesetzt werden. Die Aufgabe des Beobachters ist es, aus den vorhandenen Messungen die unbekannten Größen zu schätzen. Der Beobachter wurde als Kalman-Busy-Filter¹ ausgelegt und implementiert.

Die Prädiktion wurde in einem ersten Schritt nach dem in Phase 1 eingesetzten Verfahren (Verlauf des Vortages mit Parallelverschiebung) implementiert. Andere an der ETH getestete Methoden werden während der Testphase eingebaut und verglichen.

Die Pulsbreitenmodulation schaltet die Wärmepumpe zu Beginn einer Periodendauer ein und lässt sie solange in diesem Zustand, bis die geforderte Energie abgegeben wurde. Danach wird die Wärmepumpe bis zum Beginn einer neuen Periode ausgeschaltet. Da der abgegebene Wärmestrom vom Satag-Regler nicht erfasst wird, muss dieser über den Temperaturhub über dem Kondensator und dem Volumenstrom des Heizwassers berechnet werden. Der Volumenstrom wird nicht gemessen, nur das Ein-/Aus-Signal der Umwälzpumpe ist verfügbar. Wenn der Volumenstrom bei laufender Pumpe als konstant angenommen werden kann, ist die Methode zur Berechnung des abgegebenen Wärmestroms anwendbar. Alternativ muss über die Herstellerangaben der erwartete Wärmestrom verwendet werden. Welche der Methoden eingesetzt wird, kann erst nach Messungen im Testhaus entschieden werden.

Der Regler mit Beobachter und der Pulsbreitenmodulator wurden in Matlab programmiert und erfolgreich in der Simulationsumgebung der ETH getestet. Danach erfolgte die Umsetzung in C. Diese Implementierung wurde ebenfalls in die Simulationsumgebung eingebunden und zeigt dort das gleiche Verhalten wie die Matlabversion.

Damit der Regler in die Satag-Umgebung eingebunden werden kann, müssen noch die Schnittstellen zur Übergabe der Sensordaten und des Reglerausgangs ins Programm eingefügt werden. Die Sperr- und Niedertarifzeiten werden von Satag noch verfügbar gemacht, alle anderen Daten sind vorhanden.

¹ Hans P. Geering: Mess- und Regelungstechnik, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1990.

Implementierung

Bis Ende 2000 erfolgt die Implementierung der beiden Algorithmen in zwei Wärmepumpenregler durch Satag. Diese beiden Regler stehen dann im Januar zur Erprobung auf der Referenzanlage zur Verfügung.

Die Implementierung des energiekenmlinienbasierten Algorithmus in einen Regler durch Siemens kann etwas später erfolgen. Dieser Regler muss spätestens in Phase 3 zur Erprobung auf dem ETHZ-Prüfstand zur Verfügung stehen.

Zusammenarbeit

Wie bereits mehrfach gesagt, besteht eine enge Zusammenarbeit mit den beiden Industriepartnern Satag Thermotechnik AG und Siemens Building Technologies (Europe) AG.

Zu den nachfolgenden Projekten mit verwandter Zielsetzung wird die Kommunikation sichergestellt:

- E. Shafai et al.: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Phase 5: Fehlerdiagnose am dynamischen Prüfstand. Bern: Bundesamt für Energie.
- Th. Afjei et al.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 1-4. Bern: Bundesamt für Energie, 1999.
- Th. Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW. Bern: Bundesamt für Energie, 1999.
- M. Erb et al.: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (FAWA). Bern: Bundesamt für Energie.

Wärmepumpenkolloquium an der Technischen Universität Dresden am 2. Februar 2001:

E. Shafai ist zu diesem Kolloquium eingeladen, um über das Prinzip der PBM, ihre Anwendung und erste Erfahrungen zu sprechen. Die Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Habil. Zschernig arbeitet ebenfalls auf dem Gebiet der Wärmepumpe. Das aktuelle Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der Entwicklung von neuen, bedarfsgerechten Schaltungen. Dieses Projekt neigt sich dem Ende zu, und aus diesem Anlass werden die Ergebnisse im Rahmen des erwähnten Kolloquiums der Fachwelt vorgestellt. Der Teilnehmerkreis setzt sich aus Vertretern von Forschung und Entwicklung, Herstellern, Planern und Installateuren zusammen. Der Titel des Vortrags von E. Shafai lautet «Die Revolution bei der Wärmepumpenregelung – Pulsbreitenmodulation – Prinzip und praktische Erfahrungen».

Umsetzungen 2000

Noch keine Umsetzungen im Jahr 2000; die beiden Industriepartnern sind jedoch an späteren Umsetzungen in die Praxis sehr interessiert.

Perspektiven für 2001

Anfangs Januar (Woche 2) wird die neue Wärmepumpe in der Referenzanlage «Winterthur» installiert. Die Anlage wird dann nach einer kurzen Einregulierungsphase für die Erprobung der beiden PBM-Regler zur Verfügung stehen.

Bis Ende der Heizsaison werden die beiden PBM-Regler alternativ betrieben und die Daten durch das unabhängige Mess- und Datenaufzeichnungssystem erfasst.

Parallel dazu erfolgt die Datenaufbereitung, Datenauswertung und Datenkontrolle sowie die laufende Funktionskontrolle und Anpassung des jeweiligen PBM-Reglers.

Die Langzeit-Datenauswertung und der Schlussbericht sind auf den Sommer 2001 geplant.

Publikationen 2000

Keine Publikationen im Jahr 2000.