

蓄熱式空調プラントの最適制御における 発停頻度低減手法と運転計画修正法の提案

中村安弘^{*1} 栗山 憲^{*1} 山本正幸^{*1}
福代和宏^{*1} 小西克浩^{*2}

本報では、2段階シンプレックス法に基づく簡便で実用的な最適化手法を適用して求められた複数熱源機器を有する蓄熱式空調システムの最適運転計画の具体的修正法を提案した。一つは、熱源機器の頻繁な起動と停止による機器寿命への悪影響を防ぐためのデジタル・トポロジー的な概念を用いた発停頻度低減手法の提案である。一つは、翌日一日を対象とした長時間負荷予測に基づき立案された最適運転計画を、より精度の高い短時間負荷予測に基づいて修正する手法の提案であり、もう一つは夕刻に再度残蓄熱量を基に夕刻以降の再最適運転計画を立て、夕刻以降はこれを基に短時間負荷予測による修正を行うことの提案である。

キーワード：最適制御・空調用熱源プラント・蓄熱槽・発停頻度低減・負荷予測

はじめに

民生用エネルギーに占める空調用エネルギーの割合が高いことから省エネルギー技術の開発努力が日夜行われている。筆者等は、蓄熱式空調用熱源プラントの最適制御問題を省エネルギー技術開発の一環としてとらえ、つぎの流れによる研究開発を行ってきている。

- 1) 過去の外気温のデータより、運転対象日の最高気温と最低気温を予測し、これと過去の統計データより翌日一日の気温変化を予測する。
- 2) 運転対象日の最高気温と最低気温の予想値と過去の熱負荷や曜日情報などから、翌日一日分の熱負荷の予測を運転対象日の前夜に行う。
- 3) 予測された熱負荷に対して熱源プラントの運転経費が最小になるように、熱源機器および蓄熱槽の翌日一日分の運転計画を前夜に立案する。このとき、熱源機器の起動と停止が頻繁に起こることを防ぐための方法を講じる。
- 4) 運転対象日になったら、30分程度先の熱負荷を精度良く予測し、3)で求めた運転計画を随時修正しながら熱需要を満たす最適運転を行う。このとき、

蓄熱槽の残蓄熱量に基づき、夕刻に再度夕刻以降の最適計画を行いより適切な最適運転を行う。

このうち、1)、2)に関しては既に著者らには研究蓄積があり^{1~4)}、また、上記3)の前半については、線形計画法に基づいて運転コストを最小にする熱源機器および蓄熱槽の最適運転制御手法を提案した⁵⁾。この最適運転制御法を用いることで、与えられた熱負荷に対して最も運転コストが少ない運転計画を立てることが可能となり上記1)および2)の手法と組み合わせることで翌日一日の外気温と熱負荷を予想しながら最小の運転コストを実現する熱源プラントの最適運転制御を計画することができる。しかし、3)の後半にもあるように、熱源プラントを実際に運転する際には、熱源機器の起動停止計画問題も考慮すべきである。また、本手法のように翌日の熱負荷を予測して最適運転を計画する場合、実際の熱負荷に対して運転計画を随時修正していかなければならない。つまり、先に述べた最適運転制御法によって前日に運転計画を求めた後、その計画に対して、以下の3点を考慮することにより、より現実的な運転計画への修正が可能となる。

- a) 先の最適運転制御法で求めた計画の中には熱源機器の急激な起動・停止が行われるような組み合わせも存在し得る。従って、最適運転制御法で得られた計画を大幅に変更することなく、熱源機器の急激な起動・停

^{*1} 山口大学工学部 正会員

^{*2} 関西電力株式会社

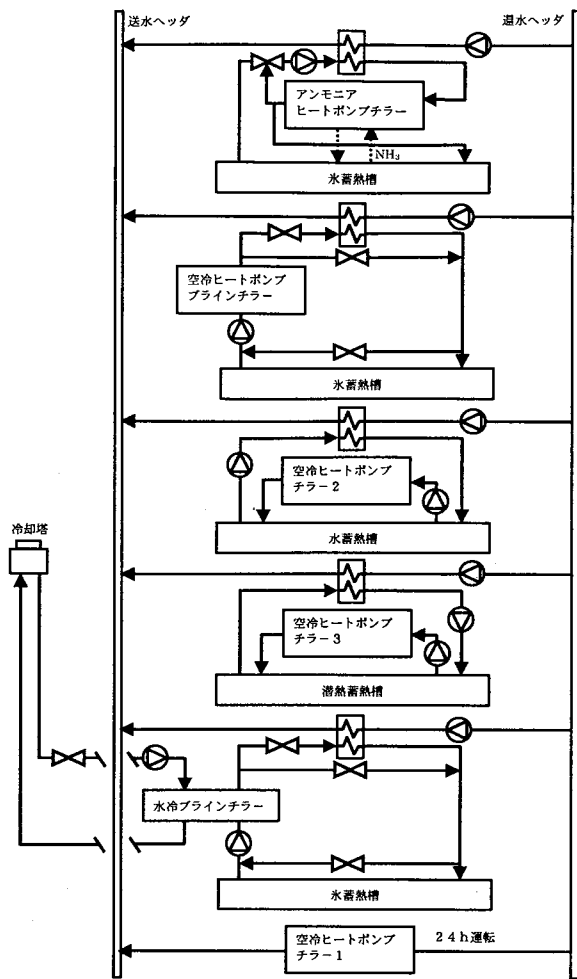


図-1 対象施設の空調用熱源システム

止が行われないように修正を施す。

- b) 運転当日に短時間先の熱負荷予測を行うことにより、前日に予想した熱負荷との誤差を適時修正し、熱源機器の運転計画を立て直す。
- c) 後述するように、本手法では、ピークカットのために13:00~16:00の間はできるだけ蓄熱槽からの放熱のみで賄うように計画している。つまり、この時間帯の熱負荷の変動により以後の放熱量の計画に大幅な変更が必要になる可能性がある。従って、この時間帯が終了する16時以降に蓄熱槽に残った総蓄熱量を基に、もう一度、線形計画法による最適運転制御法を適用して計画し直す。

上記 a) に対しては起動・停止費用を考慮して改良した分枝限定法で解く手法⁶⁾や遺伝アルゴリズムを用いた手法⁷⁾、マルチエージェントシステムを用いた手法⁸⁾などの動的な起動停止計画問題に対する手法が見られるが、本手法では、前夜にニューラルネットワークと線形計画法を適用した最適運転制御手法を行うことが前提であり、そこで求められた最適解を大きく外すことなく修正する方法をデジタル・トポロジーの概念を用いて提案する。

表-1 各冷凍機の仕様

	定格能力 (kW)	冷却方式	制御方法
アンモニアヒートポンプチラー	33.7	空冷式	2段階制御
空冷ヒートポンププラインチラー	197.1	空冷式	4段階制御
空冷ヒートポンプチラー1	377.9	空冷式	4段階制御
空冷ヒートポンプチラー2	352.3	空冷式	4段階制御
空冷ヒートポンプチラー3	201.2	空冷式	4段階制御
水冷プラインチラー	211.0	水冷式	連続制御

表-2 各蓄熱槽の仕様

	最大蓄熱容量 (MJ)	最大蓄熱能力 (kW)	最大放熱能力 (kW)
アンモニア氷蓄熱	911.3	35.1	63.3
空冷ヒートポンププラインチラー氷蓄熱	3987.6	133.6	210.9
水蓄熱槽 (16槽)	6683.8	358.6	492.3
潜熱蓄熱槽 (8槽)	4506.2	189.9	105.5
水冷プラインチラー氷蓄熱	4329.2	144.1	214.5

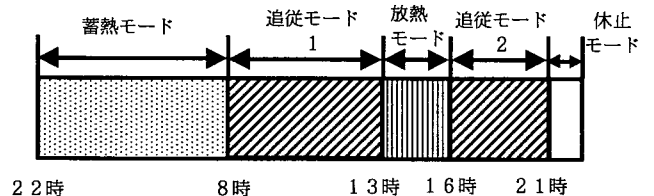


図-2 各運転モードと時間帯

また、b) に関しては、運転当日に30分先の熱負荷を予測し、運転計画を修正する方法を、さらに、c) に関しては、前報⁵⁾で提案した一日を通しての最適運転制御法を16時~21時までの5時間のみ適用することで対処した。

本論文では、これらの修正法の提案と前報⁵⁾で求めた最小運転コストの計画案に本手法を適用することで、その有効性を確かめた。

1. 最適制御の対象とする熱源システム

1.1 熱源システムと運転モード

本論文では、表-1と表-2に示す6台のヒートポンプチラーと5槽の蓄熱槽が図-1のように設置された実在する施設の空調用熱源プラントを研究対象とした。本施設は地下1階・地上3階のRC造で総延べ床面積が約9000m²の研究所で、熱源プラントは、研究用を兼ねていることから通常のプラントより複雑な構成となっている。また、本施設の熱源プラントでは図-2に示す5つのモードで運転されている。ここで、放熱モードでは熱負荷を蓄熱槽からの放熱のみで賄い、追従モードでは熱源機器と蓄熱槽の両方から熱量の供給を行う時間帯である。

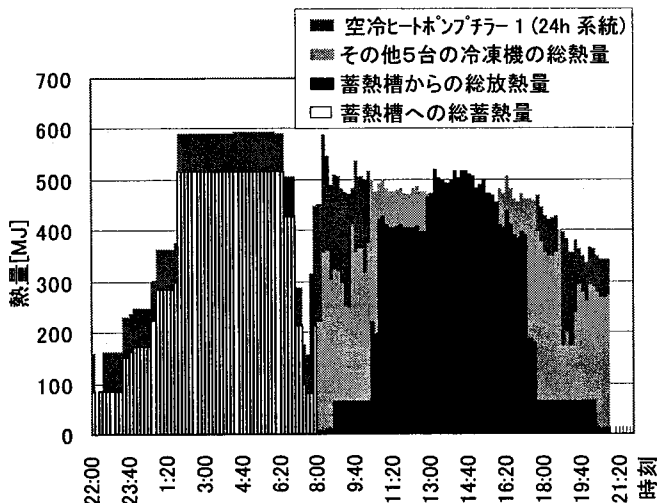


図-3 最適運転制御による運転状況(1999年8月2日)

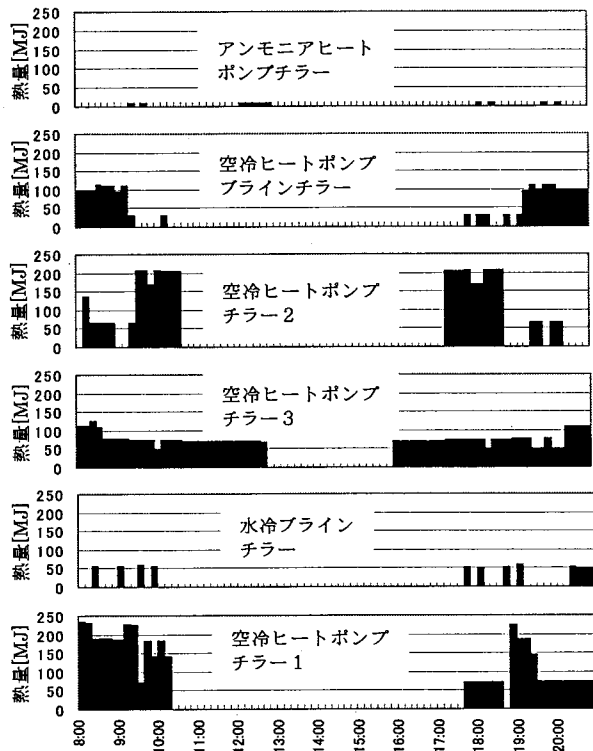


図-4 最適運転制御における各冷凍機の運転状態(1999年8月2日)

1.2 対象施設の最適運転制御結果

図-3は、先に述べた最適運転制御法によるシミュレーションの運転結果を示し、図-4は、そのときの各冷凍機の運転状況を示したものである。ただし、図-4は冷凍機の頻繁な起動・停止が生じる可能性が高い8:00~21:00の時間帯における運転状況を示している。これらの図より、我々が提案した最適運転制御手法では、夜間22時より翌朝8時までには24時間系統以外の冷凍機は蓄熱を行い、8時~21時までの間は、与えられた熱負荷を充分賄えるように、蓄熱槽からの放熱量と冷凍機からの生成熱量が効率良く配分されているのがわかる。この運転計画により最小

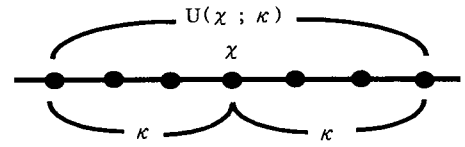


図-5 κ 近傍

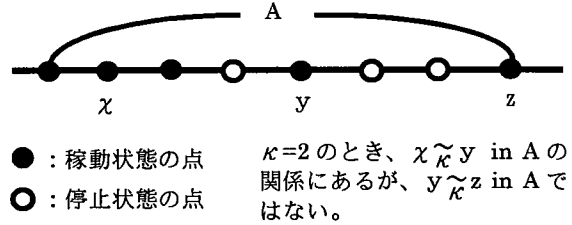


図-6 $\kappa=2$ の時の $x \sim_{\kappa} y$ in A

コストの運転が可能となるが、図-4に示すように、急な冷凍機の起動・停止が行われている箇所がみられる。これは、電力量を最小にするように最適運転制御を行った時に、外気温に対する冷凍機のCOPの変化と、その時間帯に賄わなければならない熱負荷の変動によって最も低コストとなる組み合わせが変化するためである。このような頻繁な冷凍機の起動・停止は機器の寿命に悪影響を及ぼすので、次節ではこの問題を解決するための手法について述べる。

2. 発停頻度低減手法

冷凍機の頻繁な起動・停止を避けるために、前節で求めた最適運転計画を適切に修正することにより、いったん起動させれば一定時間以上連続して稼動させ、同様にいったん停止させれば一定時間以上連続して停止させるようにする。そのためにデジタル・トポロジー⁹⁾の概念を用いて、各冷凍機の1日全体の大局的な運転状況(たとえば稼動状態がどのように連続しているか、稼動状態の時刻全体はどのように分割・グループ分けできるかなど)を把握すると、見通しの良い自然な修正を行うことが可能となる。具体的には、連結成分の考えによる1日全体の稼動状態の分割・グループ分け、各分割された稼動状態の修正した場合の時間長を示す連結成分の長さ、分割をもとにした運転状態の分類、さらに連結成分の細かな分割などにより、運転計画の修正を行う。

2.1 連結成分

本論文の最適運転制御法では、10分毎に各冷凍機の運転計画を立てているが、各冷凍機の稼動状態と停止状態を点として捉え、1日をそのような点の集合と見なす。すると、各冷凍機を稼動状態と停止状態にデジタル化することができるので、その集合上で急な起動・停止が行われないように運転計画に修正を加えれば良い。

ここで、一日を10分毎に区切ってできる運転状態の点の集合をXとする。Xの要素 x ($x \in X$ と書く)に対して、 x の κ 近傍を式(1)のように定義する。(図-5)

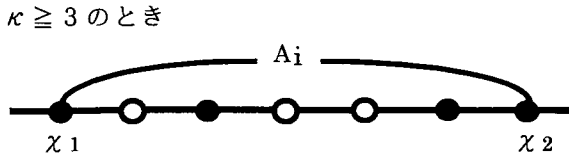


図-7 連結成分の長さ |A_i|

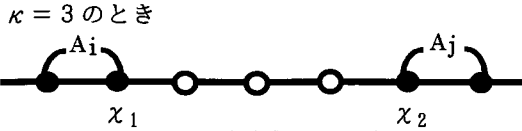


図-8 連結成分間の距離

$$U(\chi; \kappa) \equiv \{\chi - \kappa, \chi - \kappa + 1, \dots, \chi - 1, \chi, \chi + 1, \dots, \chi + \kappa\} \cap X \quad \dots(1)$$

ここで、稼動状態の点全体からなる集合を A とするとき、点 $\chi, y \in A$ に対して χ と y は A 上で κ -同値 ($\chi \underset{\kappa}{\sim} y$ in A と書く) であるとは、

$$\chi = \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m = y \quad \dots(2)$$

かつ、

$$\chi_{i+1} \in U(\chi_i; \kappa) \quad (i = 1, \dots, m-1) \quad \dots(3)$$

となる点列 $\chi_i \in A (i = 1, \dots, m)$ が存在することである。つまり、 χ と y の間には、 κ 以上の停止点が存在しない関係を意味する。

さらにこの、A 上で κ -同値、という関係は同値関係、すなわち、

$$\chi \underset{\kappa}{\sim} \chi \text{ in } A \quad \dots(4)$$

$$\chi \underset{\kappa}{\sim} y \text{ in } A \Rightarrow y \underset{\kappa}{\sim} \chi \text{ in } A \quad \dots(5)$$

$$\chi \underset{\kappa}{\sim} y \text{ in } A, y \underset{\kappa}{\sim} z \text{ in } A \Rightarrow \chi \underset{\kappa}{\sim} z \text{ in } A \quad \dots(6)$$

であることが示せる (図-6)。

$$\chi \in A \text{ に対して、集合 } [\chi] \text{ を} \\ [\chi] \equiv \{y \in A; \chi \underset{\kappa}{\sim} y \text{ in } A\} \subset A \quad \dots(7)$$

と定義し、この $[\chi]$ を χ の連結成分という。

ここで、任意の $[\chi]$ と $[y]$ に対して、関係 $\chi \underset{\kappa}{\sim} y$ in A は同値関係だから、 $[\chi] = [y]$ または $[\chi] \cap [y] = \emptyset$ であることが示せるので、各連結成分を A_i とすると $i \neq j$ ならば $A_i \cap A_j = \emptyset$ であり、また、全ての A_i の和集合が A となることから、 $\chi \underset{\kappa}{\sim} y$ in A の関係を用いることで各冷凍機の稼動状態からなる点全体の集合 A を、各グループ (連結成分) 間の間隔が κ 以上であるいくつかのグループ (連結成分) に分けることができる。

2.2 連結成分の長さ

冷凍機の連続運転時間を考えるために連結成分の長さを定義する。本論文では、10 分毎の運転状態を計画しているため、1 点の運転状態に対する時間は 10 分間である。つまり、連結成分の要素の個数が、そのまま運転時間と対応することになる。

ここで、図-7 に示すように、ある連結成分 $[\chi]$ を A_i としたときに A_i の中の左端を χ_1 、右端を χ_2 としたと

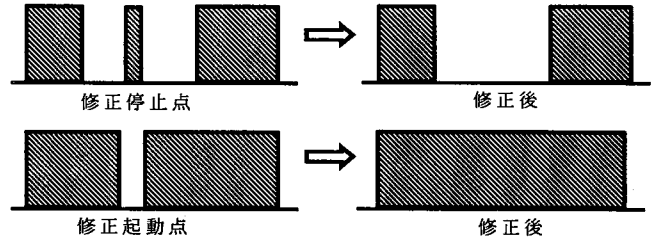


図-9 修正停止点と修正起動点

表-3 運転状態の分類

分類	最適運転計画 => 発停制御後
連続停止点	OFF => OFF
修正停止点	ON => OFF
発動可能点	OFF => ON, OFF どちらでも可能 原則的に OFF
修正起動点	OFF => ON
連続運転点	ON => ON

きの連結成分の長さ $|A_i|$ を以下のように定義する。

$$|A_i| = \chi_2 - \chi_1 + 1 \quad \dots(8)$$

上記の定義より、連結成分の長さを求めることで、その冷凍機の連続運転時間を考えることができる。

2.3 連結成分間の距離

稼動全点の集合 A を $\chi \underset{\kappa}{\sim} y$ in A の関係を用いて連結成分に分けると、各々の連結成分間の距離は κ 以上となる。図-8 において、 A_i の右端の点を χ_1 、 A_j の左側の点を χ_2 とすると以下の式が導かれる。

$$(\chi_2 - \chi_1) - 1 \geq \kappa \quad \dots(9)$$

つまり、冷凍機の連続停止時間は $\chi \underset{\kappa}{\sim} y$ in A の関係により類別した連結成分間の距離と考えられるので、 κ を変更することで冷凍機に必要な連続停止時間を調整できる。

2.4 運転状態の分類

第1節で求めた最適運転計画での各冷凍機の稼動状態の点全体 A は、上で述べたことにより、互いの距離が κ 以上で、長さが $| \quad |$ で表されるいくつかの連結成分 (グループ) に分割できる。最初に A をこのような連結成分へ分割し、その分割が行われていることを前提にして、冷凍機の各点 (各時刻) における運転状態を以下のように5つに分類する。上述の定義を用いることで、連結成分の長さが一定値以下の場合には冷凍機の運転時間が短いと考えられ停止状態にする候補点と考えられる。また、連結成分間の中に含まれる停止状態の点は、連続停止時間が κ より小さいので連続的に運転する候補点とみなす。本報では前者を修正停止点、後者を修正起動点と記述する (図-9)。

また、停止状態から修正する必要がない点を連続停止点、運転状態から修正する必要がない点を連続運転点、連結成

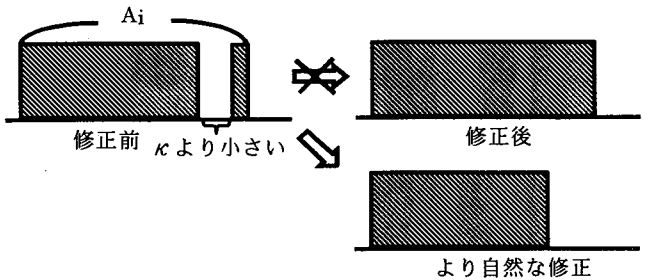


図-10 短い運転時間が連続運転内にある

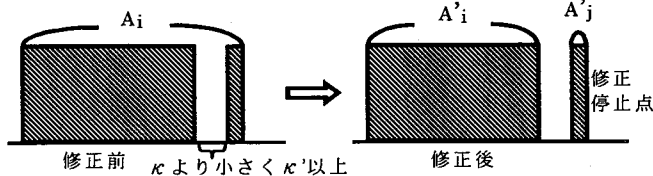


図-11 2段階の類別

分間の距離が十分離れており、連結成分と隣接している停止点で運転・停止が連結成分の関係に影響しない停止点を発動可能点と記述し、各点を分類する(表-3)。

2.5 二段階の類別による修正

これまでのアルゴリズムで、連続運転時間と連続停止時間を考慮した冷凍機の運転制御計画を立てられるが、図-10のように間隔が κ より小さい値で、かつ、運転時間が短い場合は停止点の全てを運転するよりも、短い間隔を修正停止点とする方が、より自然的な運転計画と言える。このような運転を実現するために、 κ で類別した A_i に対して、 $\kappa' < \kappa$ となる κ' で再分割を行う。すると、図-11のように連結成分は更に2つの連結成分に分割されるので、それぞれの連結成分の長さを計り十分に短ければ修正停止点とする。

2.6 運転状態の修正

上記のアルゴリズムを適用することで、冷凍機の急な起動・停止の回数を低減するような修正を加えることができる。しかし、上記の修正アルゴリズムを適用することで、予想された熱負荷を生成できなかつたり、先に求めた最適計画法から大幅に変更されて総消費電力が著しく上がってはならない。そのために、図-12に示したような手順で修正を行う。

2.7 発停頻度低減手法の適用効果

本手法により最適運転計画を修正し30分以上連続運転あるいは連続停止を実現し、かつ、求められる熱負荷を生成できる運転計画が実現できた。また、1999年8月2日から8月6日の夏期5日間の冷房負荷に対する最適制御運転計画に対し発停頻度低減手法を適用した結果、5日間を通しての全発停回数(ON/OFFあるいはOFF/ONの切り替えを一回と数えた回数の和)は61%削減できた。

また、本手法を適用し一部に最適解よりも発停頻度低減を優先させた運転により消費電力がわずかながら増え、電

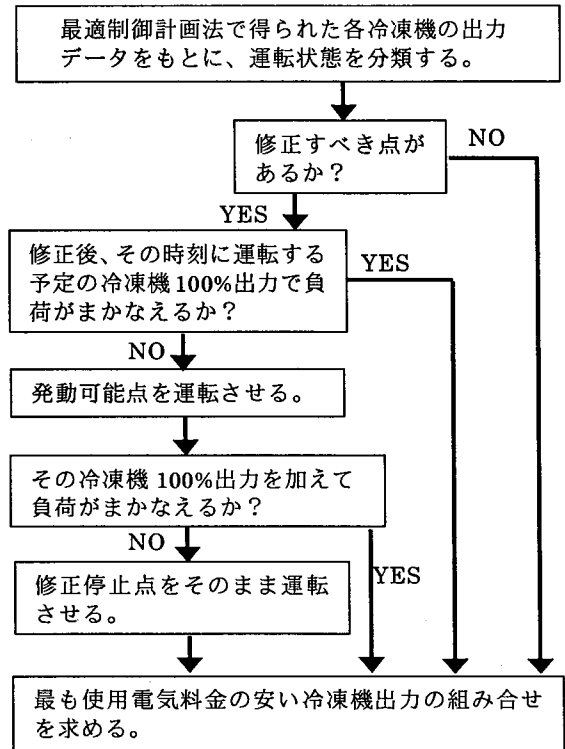


図-12 運転計画修正手順

力料金にして0.4%の増加したが、熱源機器の起動電流などを考慮すると、発停頻度が低減されたことによる省電力効果により、逆に省エネルギー・省コストになる可能性もある。この点については今後の研究課題の一つとしたい。

3. 短時間負荷予測に基づく運転計画の修正

3.1 負荷予測

蓄熱空調システムでは、翌日の負荷に見合った適切な蓄熱を行うためには翌日一日の長時間負荷予測が要求され、また、立ち上げに時間を要する吸収式ヒートポンプチラーでは、その円滑な起動と停止を行なうために30分程度先の短時間負荷予測が要求される。そこで、筆者等はこれまで翌日一日を対象とした長時間負荷予測と30分先の短時間負荷予測手法の開発を行ってきた^{2), 3), 4)}。

図-13はK社の総合技術研究所の夏期の冷房負荷に対する長時間負荷予測結果と短時間負荷予測結果の一例を示したもので、図-14は長時間負荷予測による日積算負荷の予測結果を示したものである。負荷予測手法としてはニューラルネットワーク手法を用い、長時間負荷予測では、説明変数として一週間前と予測対象日両日の休日情報、日最高気温、冷房負荷を採用し、30分先の短時間負荷予測では説明変数として一週間前、60分前、30分前の冷房負荷を採用した。

予測対象施設の負荷は立ち上げ時に突出して大きく、昼間も小刻みに変動するため地域冷暖房施設の負荷に比べ

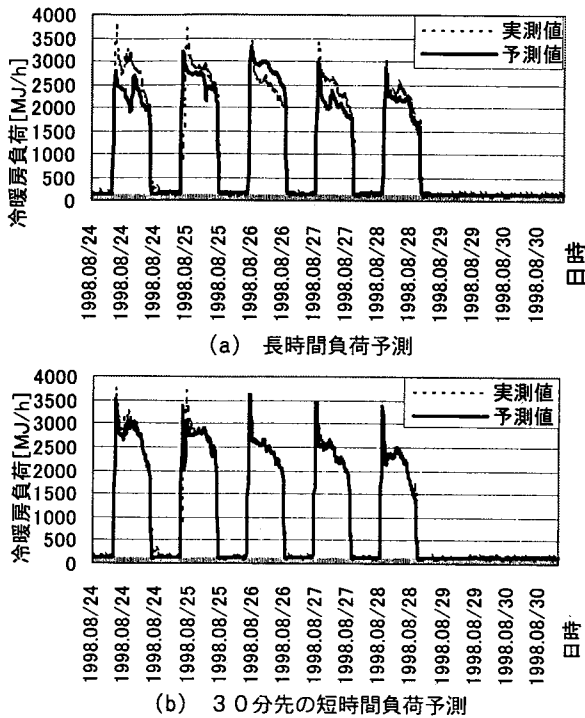


図-1 3 冷房負荷の予測結果(8/24(月)～8/30(日))

て予測が難しい施設となっているが、長時間負荷予測の場合でも、最適制御にとって重要な7時50分から21時までの冷房負荷の大きい時間帯の平均予測誤差は13.0%に収まり、30分先の短時間予測では平均予測誤差5.9%での予測が可能である。また、長時間負荷予測での一日の積算負荷の平均予測精度は9.5%であり、このことは、前夜の蓄熱運転を平均誤差10%以内で行えることを意味している。

最適制御対象日の前夜に前述の長時間負荷予測に基づき翌日一日の蓄熱、放熱、並びに熱源機器の最適運転計画を立てることになるが、長時間負荷予測は日積算負荷で9.5%、各時刻ごとの負荷で13.0%の平均予測誤差があるため、最適制御対象日当日は精度のより高い負荷予測に基づいた運転計画の修正が必要となる。ここでは30分先の短時間負荷予測に基づく運転計画の修正法について述べる。短時間負荷予測に基づき修正しても平均して5.9%の予測誤差があるため実運転ではさらに修正が必要となる。また、ここでは、熱負荷の予測誤差を総熱負荷に対する比率で示したが、現実の熱源システムの最適制御問題では誤差の絶対値と発停の制御対象となる熱源機器の容量の関係が重要となるので、本制御手法を実際に適用する際にはこのことを考慮し、実システムの機器容量に即した対応策が必要である。しかし、これらの点については、実プラントの特殊性を考慮して個々の熱源プラントごとに対応すべき問題であるので、本研究では長時間負荷予測に基づき前夜に立てられた最適運転計画を短時間負荷予測に基づ

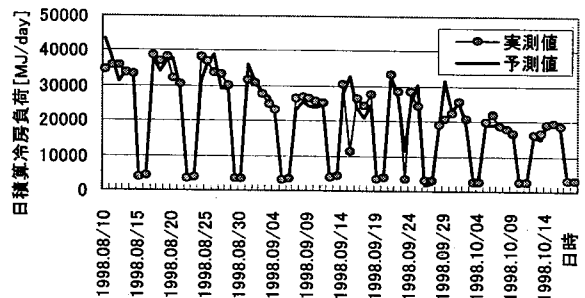


図-1 4 日積算冷房負荷の予測結果
(長時間予測, 移動平均データ 8/10(月)～10/18(日))

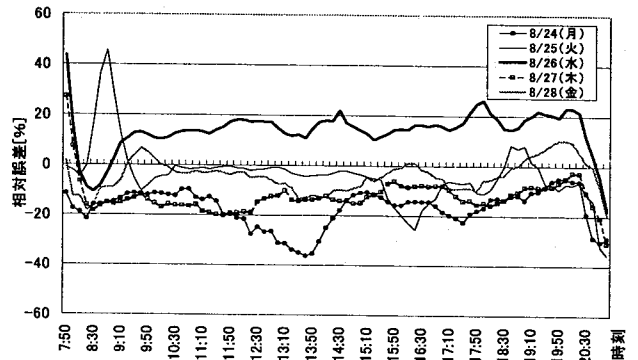


図-1 5 長時間負荷予測と短時間負荷予測の相対誤差

いて修正するところまでを扱うことにする。

図-1 5は8月の週日5日間の7:50から21:00までの長時間負荷予測結果と短時間負荷予測結果間の相対誤差(長時間負荷予測値-短時間負荷予測値)/短時間負荷予測値×100の例である。長時間負荷予測は予測対象日の前夜に翌日の最高気温などを予測して行うため、気象の変化などにより当日になっての短時間負荷予測との関係は様々である。ここでは、長時間負荷予測と短時間負荷予測の差がマイナス側とプラス側に大きい8/24と8/26の場合を取り上げ、長時間負荷予測を基に前夜に立てた最適運転計画を短時間負荷予測に基づき修正する具体的方法について述べることにする。

3.2 運転計画の修正

(1) 追従モード1

まず、蓄熱槽からの計画放熱量が30分先の短時間負荷予測結果より大きい場合等しい場合には、30分先のヒートポンプチラーの追従運転は行わず蓄熱槽からの放熱のみで対応するよう修正する。放熱量を減らす際には、蓄熱量は一日で使い切るという制約を守るために、各蓄熱槽の最短放熱時間(=残蓄熱量/最大放熱能力)の小さいもの、すなわち21:00までに残蓄熱量を0にできる能力の高いものから順次減らしていく。予測負荷が放熱量よりも大きいときは、運転予定であるヒートポンプチラーの最大出力の合計が〔予測負荷-蓄熱槽からの計画総放熱量〕よりも大きいときは蓄熱槽からの放熱量は計画通り行い、ヒートポンプチラーはその時刻に運転が予定されているヒート

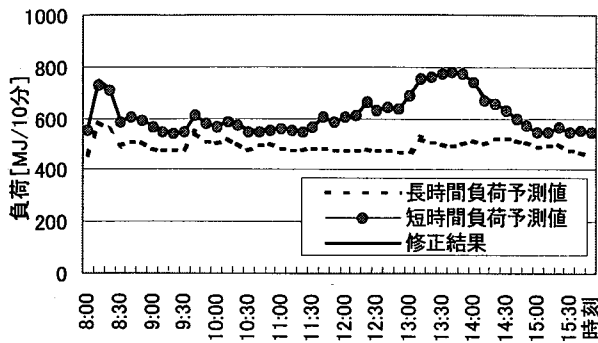


図-16 短時間負荷予測に基づく運転計画の修正

ポンプチラーの中で目的関数が最適となるように各ヒートポンプチラーの最適運転状態を決定する。もし、運転予定のヒートポンプチラー全てを最大出力にしても予測負荷を賅えない場合は、運転予定のヒートポンプチラー全てを最大出力とし、不足分はこの時点で運転されていないヒートポンプチラーの運転組み合わせの中で、目的関数が最適となる組み合わせを決定し対応する。ここで、蓄熱槽からの放熱は計画通り行うことにしているのは、短時間負荷予測に基づく修正は各時刻単位での局所的な最適修正であり、蓄熱槽からの放熱量のようにその最適化が全時刻に関わるものの修正は困難なためである。

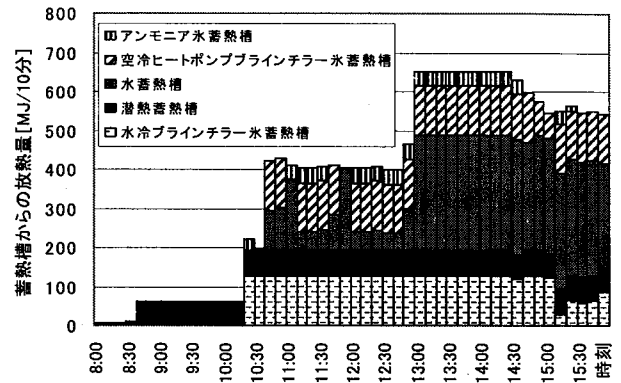
(2) 放熱モード

30分先の短時間負荷予測が蓄熱槽からの計画放熱量よりも小さいときは、予測負荷に等しくなるまで、最短放熱時間の小さいものから順に放熱量を減らしていく。予測負荷と計画放熱量が等しい場合には計画通り放熱する。予測負荷が計画放熱量よりも大きいときは、蓄熱槽からの放熱量を増加させることで対応する。このとき、どの蓄熱槽からの放熱量を増やすかについては、最短放熱時間の大きいものから順に増加させる。ただし、全蓄熱槽を最大放熱能力で運転しても負荷を賅えない特別な場合はヒートポンプチラーの最適追従運転で対応する。

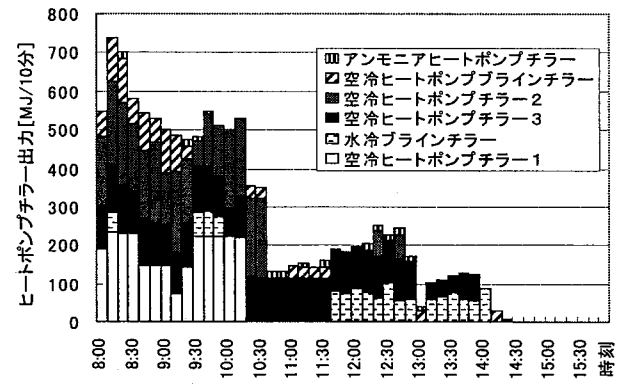
(3) 追従モード2の全時間帯の再最適運転計画

前夜に立案した蓄熱槽からの計画放熱量と実際の放熱量が異なるため、放熱運転モードが終了する16時の時点では、残蓄熱量が前夜の計画時とは異なっており、16時以降の蓄熱槽からの放熱計画を全面的に見直す必要がある。そこで、16時に実際の残蓄熱量をもとに、改めて16時以降21時までの最適運転計画を立てることにする。

この最適運転計画問題には、筆者等が提案した二段階シンプレックス法を基礎とした簡便な実用的手法⁵⁾をそのまま適用することが可能である。このとき、16時の時点で16時から21時までの長時間負荷予測が必要となるが、ここでは、ニューラルネットワークやカルマンフィルターといった一般的な負荷予測手法は適用せず、簡便な手法で予測する。例えば、16時までの実負荷と長時間負荷予測



(a) 蓄熱槽からの放熱量



(b) ヒートポンプチラー出力

図-17 短時間負荷予測に基づく修正後の運転状況

の平均相対誤差を求め、前夜に行った16時以降の長時間負荷予測値をこの平均相対誤差で補正した値を用いる。

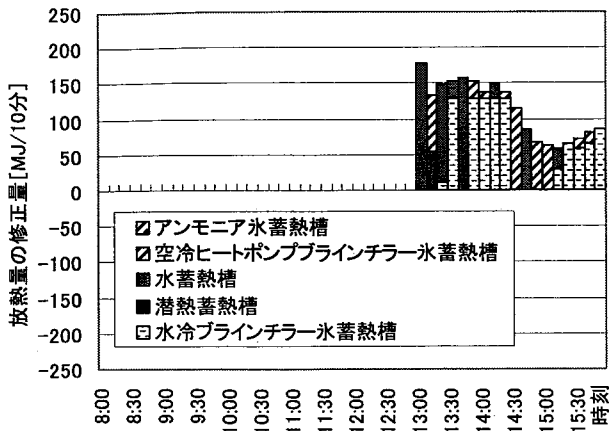
(4) 追従モード2の運転計画の修正

16時に再計画した16時から21時までの最適運転計画を再度30分先の短時間負荷予測に基づき、追従運転モード1と同様の方法で修正する。

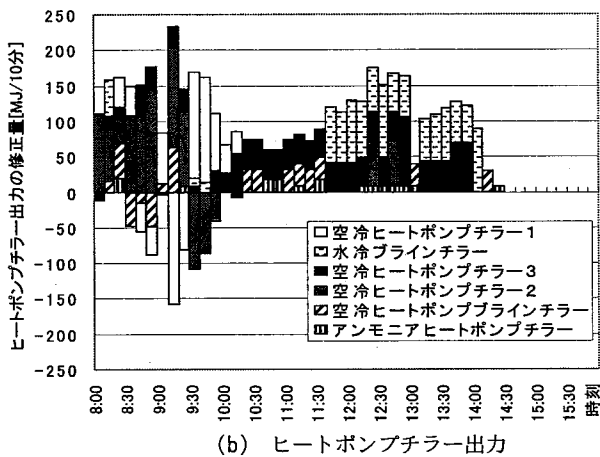
3.3 運転計画の修正結果

翌日一日の蓄熱槽からの最適放熱計画とヒートポンプチラーの最適追従運転計画は筆者等が提案した手法⁵⁾によって求めることが可能である。図-16に破線で示される長時間負荷予測に対し、図-15の8/24の誤差パターンにより短時間負荷予測が図-16の○付き細線になったときの運転計画の修正結果を図-16の太い実線で示す。このように短時間負荷予測が長時間負荷予測より大きくなって短時間負荷予測値を満たすように修正が適切に行われていることが分かる。このときの放熱運転と追従運転の詳細並びに放熱運転と追従運転の修正量を図-17と図-18に示す。この修正例では、短時間負荷予測値が長時間負荷予測値を上回っているため、8:00~13:00の追従運転モード1では蓄熱槽からの放熱量は計画値どおり運転されていることが図-18(a)から分かる。

負荷の増加への対応は、図-18(b)から分かるように、ヒートポンプチラーの追従運転出力を全体として上げることで行われる。ヒートポンプチラーはまず運転中のもの



(a) 蓄熱槽からの放熱量



(b) ヒートポンプチラー出力

図-18 短時間負荷予測に基づく修正量

で対応することになっているので、通常は運転中のヒートポンプチラーの出力値を上げて負荷の増大に対応する。ヒートポンプチラー出力の組み合わせはコストミニマムの原則に従って行われる。

13:00~16:00の放熱モードの時間帯は、原則として蓄熱槽からの放熱のみで負荷を賄い、ヒートポンプチラーの追従運転は行わないことになっている。しかし、この例では図-16からわかるように13:00から14:20の間の冷房負荷が非常に大きく、この時間帯は全蓄熱槽を最大出力にしても負荷を賄うことができず(図-17(a)の13:00~14:20の部分)、図-18(b)からわかるようにヒートポンプチラーの追従運転が例外的に行われている。ヒートポンプチラー出力の組み合わせは、連続制御のヒートポンプチラー1台と5台の段階制御のヒートポンプチラーの各出力の組み合わせの中でコストミニマムとなる組み合わせとして決定されている。

放熱モードの時間帯に蓄熱槽からの放熱量を増やすときは、最短放熱時間の大きいものから順に放熱量を増やすことを原則としている。図-19は各蓄熱槽の最短放熱時間を示したものであるが、放熱モードのほぼ全時間帯に渡り、潜熱蓄熱槽が一番大きく、順に空冷ヒートポンプ

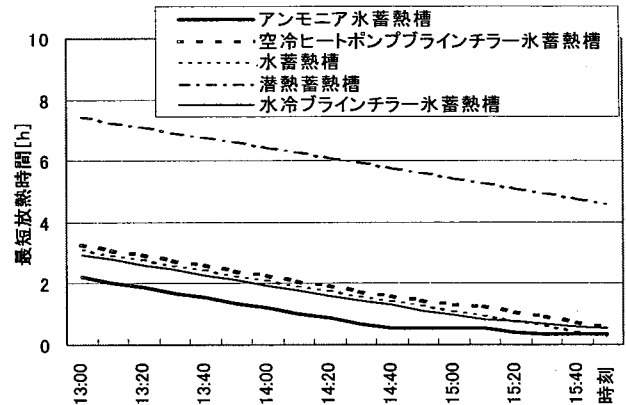


図-19 各蓄熱槽の最短放熱時間

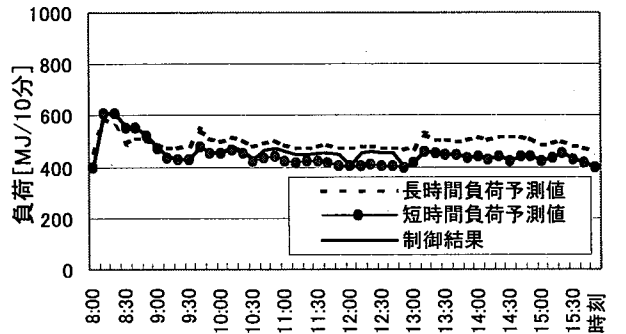
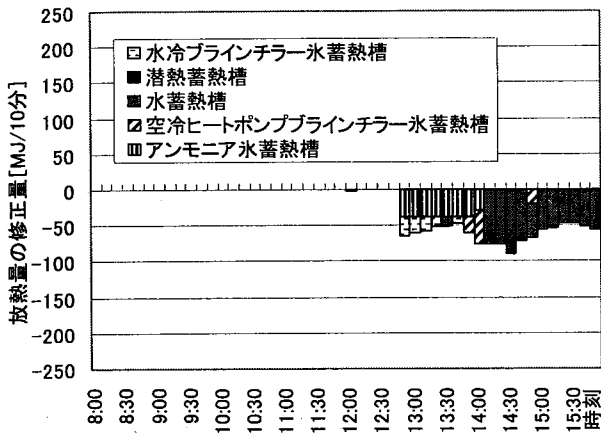


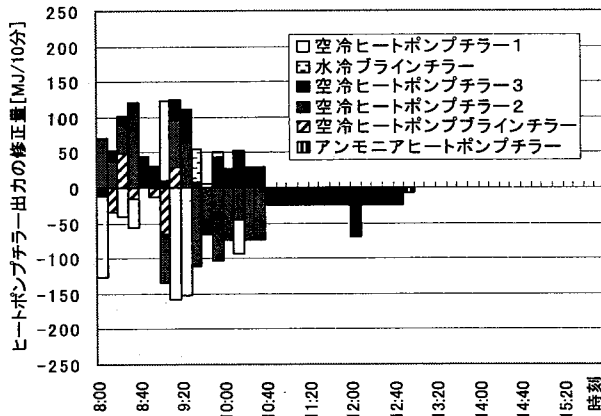
図-20 短時間負荷予測に基づく運転計画の修正

ラインチラー氷蓄熱槽、水蓄熱槽、水冷ラインチラー氷蓄熱槽、アンモニア氷蓄熱槽となっている。従って、冷熱供給量の不足分の補填はこの順番に従って蓄熱槽からの放熱量を増加させることになるが、上位の蓄熱槽に放熱を増やす余裕がない場合は順次下位の蓄熱槽の放熱を増大させる。図-18(a)の13:00に3番目の水蓄熱槽から補填されているのは、1番目の潜熱蓄熱槽と2番目の空冷ヒートポンプラインチラー氷蓄熱槽の13:00における放熱がすでに最大放熱能力での運転となっていたためである。

図-20は実細線で示される短時間負荷予測が破線で示される長時間負荷予測よりも小さくなった場合の修正例である。これは図-15の8/26の誤差パターンに相当する。短時間負荷予測が長時間負荷予測よりも小さくなくても、最適運転計画の修正は問題なく行われている。10:30から13:00にかけて運転計画の修正結果が短時間負荷予測よりも少し大きくなっているが、これはヒートポンプチラーが段階制御であることによる。図-21は長時間負荷予測に基づいて前日に立案された運転計画からの修正量を示したものである。8:00~13:00までの追従モード1の時間帯では、図-21(a)からわかるように、蓄熱槽からの放熱量は計画通り放熱されていることが分かる。また、負荷が減ることへの対応は、図-21(b)からわかるように、全体としてヒートポンプチラーの追従運転出力を減らすことで対応している。各ヒートポンプチラーの負荷配分は各時刻ごとにコストミニマムとなるように行われる。



(a) 蓄熱槽からの放熱量の修正量



(b) ヒートポンプチラー出力の修正量

図-21 短時間負荷予測に基づく修正量

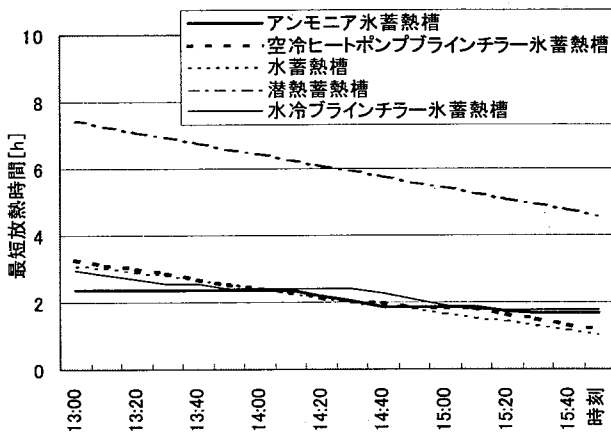


図-22 蓄熱槽の最短放熱時間

また、13:00~16:00の放熱運転モードでは、図-21から分かるように蓄熱槽からの放熱量を減らすことで負荷の減少に対応している。このとき、どの蓄熱槽からの放熱量を優先的に減らすかについては、図-22に示される各蓄熱槽の最短放熱時間の小さい順に減らしていく。図-21(a)を見ると、この原則に従い13:00過ぎにはアンモニア水蓄熱槽と水冷ブラインチラー水蓄熱槽からの放熱量が優先的に減らされ、14:20頃以降では水蓄熱槽からの放熱が優先的に減らされているのが分かる。

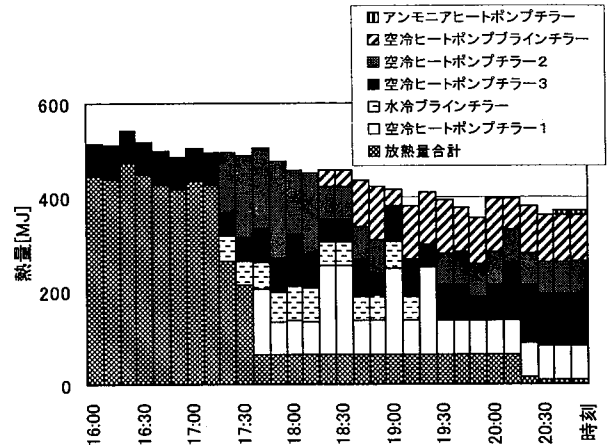


図-23 16時以降の再計画に起停頻度低減手法を適用した結果

放熱モードが終わる16時の時点では、前述の理由により各蓄熱槽の残蓄熱量は前夜に立てた計画とは異なっている。従って、16:00以降21時までの蓄熱槽からの放熱については、16:00の時点での各蓄熱槽の残存蓄熱量に基づき、最適運転計画を立て直す必要がある。この最適化問題は、筆者等が提案した2段階シプレックス法に基づく簡便で実用的な手法⁵⁾をそのまま容易に適用することができる。この際16時以降21時までの長時間負荷予測が必要となるが、ここでは、前夜に行った長時間負荷予測結果と実負荷の16時時点までの平均誤差を用いて長時間負荷予測結果を修正するという簡便な手法を用いた。図-23はこのようにして求めた16時から21時までの再最適計画の一例である。

16時から21時の追従モード2の時間帯の短時間負荷予測に基づく修正はこの再最適計画をもとに、追従モード1で述べた手法とまったく同じ方法で行うことができる。

まとめ

本報では、2段階シプレックス法に基づく簡便で実用的な最適化手法を適用して求められた複数熱源機器を有する蓄熱式空調システムの最適運転計画の具体的な修正法を提案した。

第1は、熱源機器の頻繁な起動と停止による機器寿命への悪影響を防ぐための発停頻度低減手法の提案であり、この手法は冷凍機の運転状態をデジタル情報としてとらえ、デジタル・トポロジー的な概念で冷凍機の発停頻度低減を図るものである。

第2は、翌日一日を対象とした長時間負荷予測に基づき立てられた最適運転計画を、より精度の高い短時間負荷予測に基づいて修正する手法の提案である。追従・放熱の両モードでこの手法が機能することを確認した。

第3は夕刻に再度残存蓄熱量をもとに夕刻以降の再最適計画を立て、夕刻以降はこれを基に短時間負荷予測によ

る修正を行うことの提案である。これにより夕刻以降の的確な放熱運転が可能になる。

この一連の修正法の提案は空調用熱源プラントの最適制御の実用化に寄与するものである。

尚、本論文の一部は 2002 年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集で発表したものに加筆し詳細に論じたものである¹⁰⁾。

参考文献

- 1) 中村安弘・朝野佳伸：複数熱源を有する蓄熱空調システムの最適制御に関する研究（第2報）冬季の冷暖房負荷予測，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，III（2000-9），pp.1361～1368
- 2) S.Takeuchi, M.Mizuno and Y.Nakamura: Load Forecasting for District Cooling with Kalman Filter, Proceedings of the International District Heating and Cooling Association, Vol.82(1991-6), pp.441～455
- 3) 中村安弘・水野 稔・三島憲明：複数熱源を有する蓄熱空調システムの最適制御に関する研究（その1：ニューラルネットワークによる負荷予測，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，II（1999-9），pp.873～876
- 4) 水野 稔・中村安弘・塚原 研：各熱負荷予測システムの詳細と予測結果（時系列モデルによる熱負荷予測），空気調和・衛生工学誌，67-8（1993-8），pp.43～47
- 5) 中村安弘・栗山憲・山本正幸・吉本康申・朝野佳伸：蓄熱槽を有する空調用熱源プラントの最適運転制御，空気調和・衛生工学会論文集，No.90(2003-7),pp.121～130
- 6) 横山良平・伊東弘一・神村一幸・宮坂房千加：機器の起動・停止を考慮したエネルギー供給システムの最適運用計画法，日本機械学会論文集(C編)，63巻609号(1997-5)，pp.1595～1602
- 7) 千住智信・山城寛人・島袋海・上里勝実・舟橋俊久：遺伝アルゴリズムと知的モンテカルロ法を適用した発電機起動停止計画問題，電気学会論文誌(C編)，122-8(2002),pp.1360～1640
- 8) 永田武・大野益見・佐々木博司・藤田秀紀：発電機起動停止計画へのマルチエージェント技術の適用，電気学会論文誌(C編)，121-10(2001)，pp.1641～1646
- 9) Azriel Rosenfeld・Avinash C.Kak・長尾真監訳：デジタル画像処理，(1978)，近代科学社
- 10) 栗山 憲・中村安弘・山本正幸・深野靖博・吉本康申・小西克浩：空調用熱源プラントの最適運転制御に関する研究—熱冷凍機器の起停回数低減手法の提案—，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，(2002-9)，pp.429～432

(2003年7月28日 原稿受付)

Proposal of Algorithm to Reduce Frequencies of Start and Stop and Correction Method of Operation Conditions on Optimum Control of Heating and Cooling Plant with Thermal Storage Tanks

By Yasuhiro NAKAMURA*¹, Ken KURIYAMA*¹, Masayuki YAMAMOTO*¹,
Kazuhiro FUKUYO*¹ and Katsuhiro KONISHI*²

Key Words: optimum control, heating and cooling plant, thermal storage tank, reduction of frequencies of start and stop, cooling load prediction

Synopsis: We proposed methods to correct the operation conditions of heat source equipments in a heating and cooling plant with thermal storage tanks. The operation conditions of the heat source equipments are ones determined by a practical method using two phase simplex method based on the cooling load predicted at the night before the target day when the optimum control of the plant is planned. One of our proposals is about an algorithm to reduce the frequencies of start and stop of the heat source equipments and to secure their long service

life using theory of digital topology. Another one of our proposals is about a method to correct the operation conditions of heat source equipments based on the prediction of the cooling load in the near future; that is, cooling load after thirty minutes. And the last one is to make a new optimum plan to operate the heat source equipments at 4 p.m. again based on the real amount of cold heat existing in the thermal storage tank because the rest of cold heat in the thermal storage tank usually differs considerably from values predicted at the night before the day.

*¹ Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Member

*² THE KANSAI ELECTRIC POWER Co., INC.

(Received July 28, 2003)