

論文の内容の要旨

論文題目 設計知識に基づく変電機器向け
配管設計自動化システムの開発

氏 名 井上（藤井） 麗子

本論文は、変電機器の配管設計を対象に、一品一様で設計される配管設計の工数低減を目指して、設計者の検討内容に沿うような配管を自動作成する配管設計自動化システムを提案するものである。

近年、送変電施設の需要増加に伴い、変電機器の需要も増している。送変電施設は敷地や変電仕様に応じて一品一様で設計され、その変電機器も同様である。変電機器には絶縁油や絶縁ガスが使用され、それらを輸送、あるいは密閉する配管が必ず備わる。これら配管も、機器の設計時に都度、設計する必要がある。この配管設計作業においては、工数低減と品質安定化が課題となっており、配管設計を自動化するシステムが求められている。

市販の高機能 CAD の中には単純なルールで配管経路を自動生成するものがある。また、船舶の分野では配管経路自動生成の取り組みがある、しかし、製造性やメンテナンス性、電気的性質など、変電機器の配管設計者が考慮する多数の制約は、これまで扱われていない。配管設計者が考慮する制約を反映しない自動化システムは、設計者の意図と異なる配管設計結果となり、やがて使われなくなる。また、システムの開発や改修に大きな工数を要すると、次第にメンテナンスがされなくなり、新しい案件に適用できなくなっていく。このことから、変電機器の配管設計においては、次の要求がある。

- (1) 機器構成やレイアウト変更により都度設計が必要となる配管設計について、工数低減のため設計自動化するシステムが求められる。

- (2) 多くのドメイン知識を要する配管設計の自動化システムを構築するためには、設計者が有する、対象の配管設計に関する知識を抽出して、自動化システムに反映する必要がある。
- (3) 初期段階ではユーザ(設計者)との要件定義を綿密に行ってユーザが使える基本システムを開発し、その後の反復開発ではユーザが開発工数とシステム品質を調整する作業負担を低減して早期に追加開発を回す、という手法が求められる。

本論文では、これらの問題に対し、変電機器向けの配管設計自動化システムの開発・適用・運用に向けて以下3点の技術課題解決に向けて取り組んだ。

- (1) 配管設計者の設計知識の抽出と分析
- (2) 設計知識を反映した配管設計自動化システムの開発
- (3) 継続的な機能拡張に向けた設計知識の自動化優先度評価方式の開発

本論文では、次のような概略で課題を解決した。

まず、変電機器の配管設計を担当する複数の設計者にヒアリングを実施した。そして、ヒアリング結果に対してプロトコル分析して、変電機器の配管設計に関する知識を抽出した。その中で、設計者間の知識の共通性、また、ベテラン設計者と新人設計者の知識傾向の違いを分析し、基本的な配管作成に必要な知識を特定した。

設計者の知識抽出に際しては、心理学研究法のこのプロトコル分析を用いて設計知識の記録と分析を行うことで、209件の設計知識を抽出した。その結果、配管の設計順序を特定した。また、設計者は電氣的、構造的なエンジニアリング面の機能性に加えて、製造、輸送、据付、メンテナンスというサプライチェーンの工程まで考慮していることがわかった。このうち、構造設計に関する知識が最も多いことから、まずは構造的・機能的に成立するかどうかが基本的な要件であることがわかった。

また、プロトコル分析においては、一人の設計者だけではなく、ベテランから新人まで5名の設計者にヒアリングして設計従事年数や設計知識の共通性の観点から、得られた設計知識を分析した。その結果、5人の設計者の中で複数の設計者が共通して持つ12件の設計知識を特定した。このうち、新人は共通知識のみを用いて設計していることが分かり、共通知識を用いることで新人と同等の基本要件を満たした配管を設計できる見込みを得た。

本手順により、従来扱われていない変電機器の配管設計に関するドメイン知識とその傾向を抽出して、自動化システムに反映するための指針を得ることができた。

次に、ヒアリングで得た設計知識を基に、配管設計自動化システムを開発した。配管設計時間の目標値は、現在の配管1本あたり24分に対し、確認・修正時間含めて半減すること、確認・修正には、現状の検討時間と同等の約10分を要することから、CAD上でのシステム入力から配管経路を探索してCAD上で自動モデリングするまでの目標値を、配管1本あたり1分以下とした。

開発にあたり、ユーザ(設計者)の要望を確認して反映することを基本とし、ヒアリング結果

の分析から得られた見解を提案して、開発項目をすり合わせる形で進めた。

配管設計プロセスのうち、配管の始点と終点を決める際には、本体内部の構造設計者と調整の上で配管の取り付け位置を決める必要があるため、自動化せず設計者に指定させることとした。配管径の決定、配管経路の決定、品質確保のための配管調整については、システムで自動化することで設計工数の低減を目指した。

設計知識のうち、複数の設計者が共通して持つ 12 件の設計知識を基本的な配管作成のためのルールと判断し、その中で配管径の決定に関する 2 件、配管経路の決定に関する 4 件、配管調整に関する 1 件を選定した。また、新人でも品質の高い配管を作成できるようにすることを狙いとし、熟練者の設計知識 2 件と、一般知識として総経路長を短くすると材料コストが下がる点を考慮した 1 件を追加し、計 10 件の知識を用いた。

配管径の決定に関する 2 件は、CAD で必要条件を入力する画面にて標準配管径から候補を選択する機能として実装した。

配管経路の決定に関する 4 件、熟練者の知識 2 件、一般知識 1 件は、配管経路を自動生成する機能に反映した。配管経路の生成では、機器の配置された 3 次元空間をボクセル分割してグラフ化し、空間内の最短経路問題に対する高速な求解法であるダイクストラ法を応用して経路探索した。設計知識は、ボクセル空間への重みづけと、グラフ探索時の制約として反映した。また、ボクセル空間で経路探索した場合、機器側の始点終点位置とズレが生じるため、ズレ補正する手法を提案した。

さらに、3DCAD と連携し、算出された経路とパラメータを基に自動作図することで、設計時の作図工数低減を図った。

開発したシステムを検証した結果、他部品との干渉がない配管経路を 1 経路あたり 33 秒で自動生成するシステムの実現、および、設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成を確認した。

このことから、本論文で提案した配管設計自動化システムによって、配管設計工数が低減できることが明らかになった。

最後に、今後、現場適用に当たっては、機能拡張して有用性を増すことになる。そこで、設計者が要求機能を選定する作業工数の低減を目的として、自動化システムに含める機能を優先度付けして短期で選定する手法を開発した。

工数の推定には、システム開発の超上流でも開発規模を見積もることができる FP 試算法を適用した。一方で、自動化効果を適量的に算出する手法は従来研究にない。そこで、自動化効果は、（１）対象ユーザが多いほどシステムによる自動化の効果が高い、（２）対象とする配管箇所が多いほど自動化の効果が高い、（３）適用可能な案件数が多いほど自動化の効果が高い、という観点から、設計者人数、対象配管本数、適用案件割合の積算により求めた。以上の FP 試算法で得られた工数を自動化効果の評点で除した値で、適用優先度を算出する方法を提案した。

提案手法を、ヒアリングで得られた 209 件の知識のうち、配管設計以外の参考知識を除いた 142 件に対して適用し、優先度を計算して評価した。その結果、提案手法の優先度上位 5 割に、

設計者要求ベースによる実装済み項目の 78%が含まれており、提案手法で従来の要件定義による実装機能の選定と同等の選定能力を持つことを確認した。また、従来の要件定義は約 3 週間を要したが、提案手法で優先度を算出するまでの期間は 0.8 日であり、調整工数を 95%削減できる見込みを得た。

このことから、提案手法を用いることで、早期に追加開発を回す際に障害となる、ユーザが開発工数とシステム品質を調整する作業負荷を低減可能な見込みを得た。

また、参照する知識の数で機能に優先度を付与するソフトウェア要求整理を適用し、提案手法と比較した結果、参照知識数による優先度の上位 5 割には、設計者要求ベースによる実装済み項目の 71%が含まれたが、提案手法の実装機能の選定能力の方が 80%と高いことから、本研究の提案手法により、設計者とシステム開発者の検討結果に近い結果が得られると考えられる。

以上の通り、本研究の一連の取り組みにより、配管設計者の設計知識を抽出して反映した配管設計自動化システムを実現し、配管設計作業の工数低減と設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成を確認した。さらに、今後のシステム改修に向けた機能選定の目処をつけ、本研究の目的を達成した。