



(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。 Int. Cl. (11) 공개번호 10-2007-0037210
G06F 19/00 (2006.01) (43) 공개일자 2007년04월04일

(21) 출원번호 10-2005-0092515
(22) 출원일자 2005년09월30일
심사청구일자 2005년09월30일

(71) 출원인 고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자 이병준
서울특별시 성북구 안암동5가 1번지 고려대학교 전기공학과
송화창
전라북도 군산시 미룡동 산 68번지 군산대학교 전기공학과
이상규
서울특별시 성북구 안암동5가 1번지 고려대학교 전기공학과

(74) 대리인 김정식

전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 유연수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입방법

(57) 요약

본 발명은 수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입방법 및 그 장치에 관한 것으로, 본 발명의 유연송전기기 최적투입방법은, AC 조류 계산에 기초하여 전력 계통 계획, 운전 정책 수립 과정 및 운용 측면에서 안정도 확보를 위해 벤더(benders) 분해법을 이용하여 수정 모드와 예방 모드를 동시에 고려한 (n-1) 상정사고의 안전도 제약 유연송전기기의 최적투입방안을 제시함으로써, 안정도를 유지하면서 최적의 운용 비용으로 운전될 수 있다.

대표도

도 2

특허청구의 범위

청구항 1.

전력 계통에서의 유연송전기기 최적투입방법에 있어서,

교류 조류 계산에 기초하여 전력 계통 계획, 운전 정책 수립 과정 및 운용 측면에서 안정도 확보를 위해, 벤더(benders) 분해법을 이용하여 수정 모드와 예방 모드를 동시에 고려한 전력 계통의 정상 및 상정 상태에 따른 소정의 안전도 제약 조건을 만족하는 상기 유연송전기기의 투입을 위한 최적해를 산출하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 2.

제 1항에 있어서, 상기 안전도 제약 조건은,

상기 교류 조류 계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효전력 상하한 제약, 전압 상하한 제약, 변압기 탭 상하한 제약, 및 유연송전기기의 운전상하한 제약 중 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 3.

제 2항에 있어서,

상기 유연송전기기의 최적 투입을 위한 최적해를 산출하기 위해 목적함수가 이용되는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 4.

제 3항에 있어서, 상기 목적함수는,

상기 전력 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 상기 유연송전기기에 따른 안전성 측면의 목적함수, 및 투입용량을 최소화의 조건 중 적어도 어느 하나의 조건을 만족하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 5.

전력 계통에서의 유연송전기기 최적투입방법에 있어서,

상기 유연송전기기의 투입 계획 단계에서, 상기 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태에 대한 상기 유연송전기기의 투입 위치 및 최적 운전점을 검색하는 단계;

상기 유연송전기기의 투입 계획에 따른 감도를 산출하는 단계; 및

상기 검색 및 산출 단계에서 얻어진 정보들을 기초로 상기 유연송전기기의 투입 용량 및 위치를 결정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 6.

제 5항에 있어서,

상기 유연송전기기의 최적 투입을 위한 감도를 산출하기 위해 목적함수가 이용되는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 7.

제 6항에 있어서, 상기 목적함수는,

상기 전력 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 상기 유연송전기기에 따른 안전성 측면의 목적함수, 및 투입용량을 최소화의 조건 중 적어도 어느 하나의 조건을 만족하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 8.

제 7항에 있어서,

상기 유연송전기기의 최적 투입 용량 및 위치를 결정하기 위한 제약 조건은,

상기 교류 조류 계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효전력 상하한 제약, 전압 상하한 제약, 변압기 탭 상하한 제약, 및 유연송전기기의 운전 상하한 제약 중 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법.

청구항 9.

전력 계통에서의 유연송전기기 최적투입장치에 있어서,

상기 유연송전기기의 투입 계획 단계에서, 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태에 대한 유연송전기기의 투입 위치 및 최적 운전점을 검색하고, 상기 유연송전기기의 투입 계획에 따른 감도를 산출하는 수정모드 산출부; 및

상기 수정모드 산출부에서 얻어진 정보들을 기초로 유연송전기기의 투입 용량 및 위치를 결정하는 예방모드 산출부를 포함하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입장치.

청구항 10.

제 9항에 있어서,

상기 산출부는 상기 유연송전기기의 최적 투입을 위한 감도를 산출하기 위해 목적함수가 이용되는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입장치.

청구항 11.

제 10항에 있어서, 상기 목적함수는,

상기 전력 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 상기 유연송전기기에 따른 안전성 측면의 목적함수, 및 투입용량을 최소화의 조건 중 적어도 어느 하나의 조건을 만족하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입장치.

청구항 12.

제 11항에 있어서,

상기 예방모드 산출부에서 상기 유연송전기기의 최적 투입 용량 및 위치를 결정하기 위한 제약 조건은,

상기 교류 조류 계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효전력 상하한 제약, 전압 상하한 제약, 변압기 탭 상하한 제약, 및 유연송전기기의 운전상 하한 제약 중 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입장치.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 전력 계통에서 유연송전기기 최적투입방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는, 전력 계통에서 수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입방법에 관한 것이다.

최근 전력계통은 전원의 원격화와 부하의 집중화에 의해 송전설비가 장거리 및 대용량화되고 있다. 또한, 우리나라도 전력 산업 구조개편에 따른 경쟁체제의 도입을 준비 중에 있다. 이에 따라 계통의 안전성 확보 및 경제적 운용을 위한 송전계통의 운용 효율개선이 필요하게 되었다.

이러한 요구에 부응하여 전력전자 기술을 이용한 유연송전기기(FACETS)에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔고, 현재는 계통 적용단계에 이르고 있다.

일반적인 유연송전기기의 최적위치와 용량산정계획은 정상 상태 전력 계통에서 안전도 제약을 만족하면서 비용을 최소화하는 최적화 문제의 형태이다. 그러나 이러한 것들을 고려하여 전력 계통의 상태별 최적 유연송전기기의 투입 계획을 위한 최적해를 얻는 것은 쉽지 않다.

또한, 종래에는 최적 유연송전기기의 투입 계획을 위한 최적해를 얻는 과정이, 전력 계통의 상태별로 별도로 처리하기 때문에 정확한 해를 찾을 수 없는 문제점이 있다. 즉, 전력 계통의 상태가 정상 상태인 경우와 상정 상태인 경우를 동시에 고려하지 않음에 따라 전력 계통의 상태에 따른 보다 정확한 최적 유연송전기기의 투입 계획을 위한 최적해를 얻을 수 없다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 본 발명의 목적은, 전력 계통의 정상 및 상정 상태를 고려하여 최적으로 유연송전기기를 투입할 수 있는 유연송전기기 최적투입방법 및 그 장치를 제공하는데 있다.

본 발명의 다른 목적은, 수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입방법 및 그 장치를 제공하는데 있다.

발명의 구성

상기와 같은 목적은 본 발명의 실시예에 따라, 전력 계통에서의 유연송전기기 최적투입방법에 있어서, 교류 조류 계산에 기초하여 전력 계통 계획, 운전 정책 수립 과정 및 운용 측면에서 안정도 확보를 위해, 벤더(benders) 분해법을 이용하여 수정 모드와 예방 모드를 동시에 고려한 전력 계통의 정상 및 상정 상태에 따른 소정의 안전도 제약 조건을 만족하는 상기 유연송전기기의 투입을 위한 최적해를 산출하는 것을 특징으로 하는 유연송전기기 최적투입방법에 의해 달성된다.

상기 안전도 제약 조건은, 교류 조류 계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효전력 상하한 제약, 전압 상하한 제약, 변압기 탭 상하한 제약, 및 유연송전기기의 운전 상하한 제약을 포함한다.

상기 유연송전기기의 최적 투입을 위한 최적해를 산출하기 위해 목적함수가 이용된다.

상기 목적함수는, 전력 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 유연송전기기에 따른 안전성 측면의 목적함수, 및 투입용량을 최소화하는 조건 중 적어도 어느 하나의 조건을 만족해야 한다.

한편, 상기와 같은 목적은 본 발명의 실시예에 따라, 전력 계통에서의 유연송전기기 최적투입방법에 있어서, 유연송전기기의 투입 계획 단계에서, 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태에 대한 상기 유연송전기기의 투입 위치 및 최적 운전점을 검색하는 단계; 유연송전기기의 투입 계획에 따른 감도를 산출하는 단계; 및 검색 및 산출 단계에서 얻어진 정보들을 기초로 유연송전기기의 투입 용량 및 위치를 결정하는 단계를 포함하는 유연송전기기 최적투입방법에 의해 달성된다.

한편, 상기와 같은 목적은 본 발명의 실시예에 따라, 전력 계통에서의 유연송전기기 최적투입장치에 있어서, 유연송전기기의 투입 계획 단계에서, 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태에 대한 유연송전기기의 투입 위치 및 최적 운전점을 검색하고, 유연송전기기의 투입 계획에 따른 감도를 산출하는 수정모드 산출부; 및 수정모드 산출부에서 얻어진 정보들을 기초로 유연송전기기의 투입 용량 및 위치를 결정하는 예방모드 산출부를 포함하는 유연송전기기 최적투입장치에 의해 달성된다.

바람직하게는, 상기 산출부는 유연송전기기의 최적 투입을 위한 감도를 산출하기 위해 목적함수가 이용된다.

상기 목적함수는, 전력 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 상기 유연송전기기에 따른 안전성 측면의 목적함수, 및 투입용량을 최소화하는 조건을 만족한다.

상기 예방모드 산출부에서 유연송전기기의 최적 투입 용량 및 위치를 결정하기 위한 제약 조건은, 교류 조류 계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효전력 상하한 제약, 전압 상하한 제약, 변압기 탭 상하한 제약, 및 유연송전기기의 운전 상하한 제약을 포함한다.

본 발명에 따르면, AC 조류 계산에 기초하여 전력 계통 계획, 운전 정책 수립 과정 및 운용 측면에서 안정도 확보를 위해 벤더(benders) 분해법을 이용하여 수정 모드와 예방 모드를 동시에 고려한 (n-1) 상정사고의 안전도 제약 유연송전기기의 최적투입방안을 제시함으로써, 안정도를 유지하면서 최적의 운용 비용으로 운전될 수 있다.

이하, 본 발명의 바람직한 실시예들을 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다. 도면들 중 동일한 구성요소들은 가능한 한 어느 곳에서든지 동일한 부호들로 나타내고 있음에 유의해야 한다. 또한, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 상세한 설명은 생략한다.

본 발명은 수정모드(corrective mode)와 예방모드(preventive mode)를 동시에 고려하여 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태를 동시에 고려하여 해당 상태에서 각 제약조건을 만족하는 최적해를 구하는 유연송전기기 최적투입방법을 제시한다.

이에 따라, 본 발명에서는 혼합정수비선형계획으로 표현되는 유연송전기기 최적투입문제를 벤더(Benders) 분해법을 적용하여 수정모드와 예방모드를 동시에 고려한 (n-1) 상정사고의 안전도 제약 유연송전기기 최적투입방안이 개시된다. 이를 통해 전력 계통 계획단계에서 정상 상태 및 선택된 (n-1) 상정사고 전력 계통 상태들에 대해 수정모드 문제를 통하여 최적 운전점 및 유연송전기기의 투입계획에 대한 감도를 계산하고 이를 바탕으로 예방모드에서 전체적인 투입계획을 수립한다. 제시한 알고리즘을 IEEE 30 모선과 수정된 뉴잉글랜드(New England) 39 모선 시험계통에 적용한 사례를 통해 그 유용성을 실시하였다.

도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 유연수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입장치를 도시한 블록도이다.

도시된 바와 같이, 유연송전기기 최적투입장치는 수정모드 산출부(100) 및 예방모드 산출부(200)로 구성된다.

수정모드 산출부(100)는 유연송전기기의 투입 계획 단계에서, 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태에 대한 유연송전기기의 투입 위치 및 최적 운전점을 검색한다. 또한, 수정모드 산출부(100)는 유연송전기기의 투입 계획에 따른 감도를 산출한다.

본 발명의 실시예에 따라 유연송전기기의 최적 투입을 위해 목적 함수가 이용된다.

유연송전기기 투입계획에서는 전력 계통 계획자가 투입하고자하는 유연송전기기의 형태에 따라 목적함수는 조금씩 다를 것이다. 본 발명의 실시예에서의 목적함수는 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 고려하여 유효전력의 계통손실, 투입된 유연송전기기에 따른 안전성 측면의 목적함수, 그리고 투입용량을 최소화하는 아래 수학식 1과 같이 나타내어진다.

$$\min f = \sum_{n=1}^{nc} f0_n + \sum_j S_{FS,j} \cdot r_j$$

$$f0_n = \alpha P_{loss,n} + f_{FS,n}$$

여기서, P_{loss} : 계통손실

n : n번째 계통상태

S_{FS} : 투입량

α : 손실감소 가중치 계수

$f_{FS,n}$: 투입된 유연송전기기에 따른 목적함수

r_j : 투입여부를 결정하는 정수

한편, 최적의 유연송전기기 투입량을 계산하기 위한 제약조건은 교류조류계산에 근거한 회로방정식, 발전기 모선의 무효 전력 상하한 제약, 전압 상하한 제약, 변압기 탭 상하한 제약, 그리고 유연송전기기의 운전상하한 제약으로 구성된다. 각각의 제약들을 아래 수학적 식 2와 같이 나타낼 수 있다. 제약조건도 역시 nc개의 계통상태를 고려하기 때문에 n번째의 계통상태에 대한 제약조건 식(2.a ~ g)과 같은 설정(set)이 nc개가 존재하게 된다.

$$P_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}) = P_{n,i0}$$

$$Q_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}) = Q_{n,i0}$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gn,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t) \leq Q_{Gi,max}$$

$$V_{Li,min} \leq V_{Ln,i} \leq V_{Li,max}$$

$$V_{Gi,min} \leq V_{Gn,i} \leq V_{Gi,max}$$

$$t_{i,min} \leq t_{n,i} \leq t_{i,max}$$

$$x_{FSi,min} \leq x_{FSn,i} \leq x_{FSi,max} + \Delta x_{FSi}^T \cdot r_i$$

한편, 예방모드 산출부(200)는 수정모드 산출부(100)에서 얻어진 정보들을 기초로 유연송전기기의 투입 용량 및 위치를 결정한다.

따라서, 교류(AC) 조류 계산에 기초하여 전력 계통 계획, 운전 정책 수립 과정 및 운용 측면에서 안정도 확보를 위해 벤더(benders) 분해법을 이용하여 수정 모드와 예방 모드를 동시에 고려한 (n-1) 상정사고의 안전도 제약 유연송전기기의 최적투입방안을 제시함으로써, 안정도를 유지하면서 최적의 운용 비용으로 운전될 수 있다.

도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 유연수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입방법을 도시한 흐름도이다.

먼저, 수정모드 산출부(100)는 유연송전기기의 투입 계획 단계에서, 전력 계통의 정상 상태 및 상정 상태에 대한 유연송전기기의 투입 위치 및 최적 운전점을 검색한다(S110).

수정모드 산출부(100)는 유연송전기기의 투입 계획에 따른 감도를 산출한다(S130).

예방모드 산출부(200)는 S110 및 S130을 통해 수정모드 산출부(100)에서 얻어진 정보들을 기초로 유연송전기기의 투입 용량 및 위치를 결정한다(S150).

이하, 유연송전기기 최적투입을 위한 벤더 분해법을 적용에 대해 설명한다.

투자문제에서 운용 문제와 투자 문제를 동시에 고려한다는 것은 정수 변수를 포함하는 혼합정수비선형계획법(Mixed Integer Non-Linear Programing)이 된다. 일반화된 벤더 분해법 이론은 단기적인 연속변수의 최적화 결정을 포함하는 중장기적인 투자문제에 대한 결정을 위한 전체적인 문제 해결 방법을 제시해 준다.

- 수정모드 부문제

수정모드 부문제는 예방모드 주문제에서 제시된 유연송전기기의 투입위치 및 투입량에 대해 각 계통상태에 대한 최적 운전점을 찾고 투입계획에 대한 감도를 계산한다. 따라서, 고려하는 전력 계통 상태들의 수만큼의 부문제가 존재한다. m번째 벤더 반복 계산에서 n 번째 전력 계통 상태에 대한 부문제는 아래 수학식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & f1_n^m = f0_n^m + \sum_j S_{FSj}^* \cdot r_j^* \\ \text{subject to} \quad & \\ & P_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}^*) = P_{n,i0} \\ & Q_{n,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t_n, x_{FSn}^*) = Q_{n,i0} \\ & Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gn,i}(\delta_n, V_{Ln}, V_{Gn}, t) \leq Q_{Gi,\max} \\ & V_{Li,\min} \leq V_{Ln,i} \leq V_{Li,\max} \\ & V_{Gi,\min} \leq V_{Gn,i} \leq V_{Gi,\max} \\ & t_{i,\min} \leq t_{n,i} \leq t_{i,\max} \\ & x_{FSi,\min} \leq x_{FSn,i} \leq x_{FSi,\max} + \Delta x_{FSi}^{*T} \cdot r_i^* \quad \lambda_n \end{aligned}$$

λ_n 은 유연송전기기 상한제약에 대응하는 쌍대변수이다. 위 부문제는 비선형문제이다. 본 발명에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 연속선형계획법(SLP)을 이용한다.

- 예방모드 주문제

nc개의 각 부문제로부터 얻은 정보를 바탕으로 구성되어 유연송전기기의 투입용량 및 위치를 결정한다. 쌍대변수는 각 부문제의 최적해에서 의 부등호제약이 단위량 변화하였을 때 부문제의 목적함수의 변화율을 나타내며, 주문제에 중요한 정보를 제공한다. 벤더 반복 m 번째 부문제 계산 후, m 번째까지의 쌍대변수 및 각 부문제의 목적함수들을 가지고 구성되는 m+1 번째의 유연송전기기의 투입결정의 주문제는 아래 수학식 4와 같이 구성된다.

$$\min f_2 = \sum_{n=1}^{n_c} f_0^{m+1} + \sum_i \mathcal{A}S_{FSi}^{m+1} \cdot r_i^{m+1}$$

subject to

$$f_0_1^{m+1} \geq f_0_1^j + \sum_i \lambda_{1,i}^j (\mathcal{A}S_{FSi}^{m+1} - \mathcal{A}S_{FSi}^j)$$

⋮

$$f_0_n^{m+1} \geq f_0_n^j + \sum_i \lambda_{n,i}^j (\mathcal{A}S_{FSi}^{m+1} - \mathcal{A}S_{FSi}^j)$$

⋮

$$f_0_{nc}^{m+1} \geq f_0_{nc}^j + \sum_i \lambda_{nc,i}^j (\mathcal{A}S_{FSi}^{m+1} - \mathcal{A}S_{FSi}^j)$$

$$r_i : 0 \text{ 또는 } 1$$

$$n = 1, \dots, nc : \text{ 각 계통상태를 나타내는 인덱스}$$

$$j = 0, 1, \dots, m : \text{ Benders iteration}$$

이하, 본 발명에 따른 유연송전기기 최적투입방법에 따른 유연송전기기 모델 및 적용 예에 대해 설명한다.

- STATCOM 모델 및 적용

유연송전기기 중 병렬보상기기인 STATCOM은 모선의 전압과 직각인 위상차를 갖는 교류전류를 모선에 주입하여 모선에 주입되는 무효전력량을 제어함으로써 모선 전압을 제어하는 기기이다. STATCOM은 정상상태 해석 측면에서의 무효전력 원으로 표현될 수 있다. STATCOM이 i번째 모선에 투입되었을 때의 무효전력 조류 방정식은 아래 수학적식 5와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{Ti}(\delta, V_L, V_G, t) + Q_{Li} - Q_{STAT,i}(V_i) - Q_G = 0$$

$$Q_{STAT,i}(V_i) = V_i \cdot I_{STAT}$$

STATCOM의 주입전류 $I_{STAT, i}$ 가 $I_{STAT, i0}$ 로 고정된 값을 가질 때, 수학적식 5를 V_i 에 대하여 미분하면 아래 수학적식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$\partial Q_{Ti} / \partial V_i - I_{STAT, i0} = 0$$

따라서 STATCOM이 투입되었을 때, 전력 조류 자코비안은 수학적식 6식과 같이 변형되어야 한다. STATCOM의 투입목적은 투입 모선에 무효전력을 제어하여 모선의 전압을 안전한 범위 내로 조정하는 것이다. 따라서 유연송전기기 투입에 따른 목적함수는 아래 수학적식 7과 같이 전압편차 최소화로 설정한다.

$$f_{FS} = \beta \sum_i (V_{n,i} - V_{i,spec})^2$$

- SSSC 모델 및 적용

유연송전기기 중 직렬보상기기인 SSSC는 선로에 선로전류와 직각의 위상차를 갖는 교류전압을 주입하여 선로 양단 모선간의 전압차이를 조절함으로써 선로에 흐르는 조류를 제어하는 기기이다. SSSC 전력조류계산 모델은 아래 수학적식 8을 기초로 기존의 전압원인버터 주입모델에 선로 조류와 주입전압의 위상차가 직각이 되어야한다는 조건을 고려하여 도출한다.

$$P_{SSSCi} = r_{SSSC} V_i^2 Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \Gamma_{SSSC})$$

$$P_{SSSCj} = -r_{SSSC} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma_{SSSC})$$

$$Q_{SSSCi} = -r_{SSSC} V_i^2 Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \Gamma_{SSSC})$$

$$Q_{SSSCj} = r_{SSSC} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma_{SSSC})$$

선로(i-j)에 SSSC가 투입된다면 SSSC에 의한 의존부하가 i모선과 j모선에 투입되므로 기존의 자코비안의 i, j모선에 해당하는 성분을 아래 표 1과 같이 간단히 수정할 수 있다. 여기서 위 첨자 0이 붙은 성분은 SSSC 투입 전의 자코비안 성분을 나타낸다.

[표 1]

$H_{i,i} = H_{i,i}^0$	$N_{i,i} = N_{i,i}^0 + 2P_{SSSCi}$
$H_{i,j} = H_{i,j}^0$	$N_{i,j} = N_{i,j}^0$
$H_{j,i} = H_{j,i}^0 + Q_{SSSCj}$	$N_{j,i} = N_{j,i}^0 + P_{SSSCj}$
$H_{j,j} = H_{j,j}^0 - Q_{SSSCj}$	$N_{j,j} = N_{j,j}^0 + P_{SSSCj}$
$J_{i,i} = J_{i,i}^0$	$L_{i,i} = L_{i,i}^0 + 2Q_{SSSCi}$
$J_{i,j} = J_{i,j}^0$	$L_{i,j} = L_{i,j}^0$
$J_{j,i} = J_{j,i}^0 - P_{SSSCj}$	$L_{j,i} = L_{j,i}^0 + Q_{SSSCj}$
$J_{j,j} = J_{j,j}^0 + P_{SSSCj}$	$L_{j,j} = L_{j,j}^0 + Q_{SSSCj}$

직렬 보상 기기인 SSSC를 연계선로에 투입하는 목적은 연계선로의 조류량을 제어하여 연계선로의 (n-1) 상정사고 발생 시 계통의 미치는 영향을 최소화하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 SSSC 투입에 따른 목적함수로 아래 수학적 9를 이용한다.

$$f_{FS} = \beta \sum_i (V_{n,i} - V_{i,spec})^2 - \gamma P_{SSSC,ij}$$

이하, 본 발명을 적용한 실험 결과에 대해 설명한다.

- STATCOM 최적투입계획

IEEE 30모선 계통을 이용하여 본 발명에서 제시한 알고리즘을 이용한 방법과 개별 상정사고를 따로 고려한 수정모드 계획을 비교한다. 여기서 부하수준은 원래의 값에서 20% 증가 시켜 중부하 수준이 되게 하였고 전압 상하한은 1[p.u]을 기준으로 부하 모선은 5% 그리고 발전기 모선은 0.5%로 하였다.

투입 후보지는 부하증가에 대한 전압감도가 가장 민감한 10개 취약 모선을 선정하였다.

표 2는 투입 후보지 모선(취약 모선)과 각각의 전압 감도를 나타낸 것이다.

초기 투입량은 0[MVAR]이다. 상정사고의 선택은 취약 모선과 연결되어 계통손실이 큰 13개의 선로를 선택하였다.

[표 2]

모선	V[p.u]	전압감도	모선	V[p.u]	전압감도
19	0.9137	-0.047616	30	0.9041	-0.035239
20	0.9193	-0.044975	25	0.9263	-0.035004
24	0.9164	-0.041246	22	0.9310	-0.033226
29	0.9194	-0.036456	21	0.9297	-0.032810
26	0.8969	-0.03529	17	0.9420	-0.032799

표 3은 각각의 상정사고를 개별적으로 고려한 수정모드를 통하여 구한 수정모드만의 STATCOM 투입계획은 나타낸 것이다. 투입 후보지로 선정된 10개 모선 모두에 총 164[MVAR]가 투입되었다.

[표 3]

투입모선	투입용량	투입모선	투입용량
17	14[MVAR]	24	20[MVAR]
19	6[MVAR]	25	14[MVAR]
20	20[MVAR]	26	20[MVAR]
21	10[MVAR]	29	20[MVAR]
22	20[MVAR]	30	20[MVAR]

표 4는 본 발명에서 제시한 알고리즘을 이용한 STATCOM의 최적투입위치 및 용량을 나타낸 것이다. 총 7개 모선에 92[MVAR]의 설비가 투입되었다.

[표 4]

투입모선	투입용량	투입모선	투입용량
21	20[MVAR]	26	18[MVAR]
22	20[MVAR]	29	20[MVAR]
25	8[MVAR]	30	6[MVAR]

표 3 및 표 4를 비교하여 보면, 본 발명에서 제시한 알고리즘을 이용한 경우, 투입 모선의 수가 4곳이 적고 전체 투입용량은 72[MVAR] 더 적게 투입되었음을 알 수 있다.

도 3은 STATCOM 최적투입계획에 따른 투입전과 투입 후의 건전 상태 및 각 상정사고 상태에서의 계통 전체 손실을 비교한 그래프도이다. STATCOM 투입 이후에 전체적으로 손실이 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

도 4는 STATCOM 최적투입계획에 따른 투입전과 투입 후의 건전 상태 및 각 상정사고 상태에서의 전압편차의 합을 비교한 그래프도이다. STATCOM 투입 이후에 전체적인 전압편차가 많이 줄어들었으며 건전 상태 및 각 상정 상태에서 전압편차가 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

- SSSC 최적투입계획

본 실시를 위해 뉴잉글랜드(New England) 39모선 계통을 5개의 발전기 모선과 7개의 부하 모선을 갖는 제1지역 및 5개의 발전기 모선과 10개의 부하 모선을 갖는 제2지역으로 나누었으며, 이때 26-27 선로, 13-25 선로, 14-24, 그리고 16-21 선로가 제1지역 및 제2지역을 연결하는 연계선로들이다. 초기 계통에서 제1지역에서 제2지역으로 연계선로를 통해 흐르는 유효전력조류를 표 5와 같이 나타낼 수 있다.

[표 5]

연계선로 (A → B)	유효전력조류 (A → B)
25→13	45.0[MW]
24→14	221.9[MW]
21→16	448.6[MW]
26→27	240.6[MW]
총합	956.1[MW]

SSSC를 연계선로에 투입하는 목적은 연계선로의 조류량을 제어하여 연계선로의 (n-1) 상정사고 발생시 계통에 미치는 영향을 최소화하는 것이다.

표 5에서 보여주는 것과 같이 네 개의 연계선로 중에서 13-25 연계선로의 유효전력 조류량이 가장 작다. 따라서 선로의 열용량 한계를 고려하여 볼 때 13-25 연계선로가 투입후보지가 된다.

표 6은 SSSC의 최적투입위치 및 용량을 나타낸 것이다. 13-25 연계선로에 9.5[MVA]의 설비가 투입되었다.

[표 6]

투입위치	투입용량
13-25선로	9.5[MVA]

표 7 및 표 8은 SSSC 투입 전후 각 계통상태에 따른 연계선로의 총 조류량, 계통손실, 그리고 전압편차를 보여준다.

[표 7]

조류량 \ 상정사고	건전	16-21	26-27	14-24
P(25,13) [MW]	45	130.3	205.8	99.1
P(24,14) [MW]	221.9	509.3	265.9	
P(21,16) [MW]	448.6		481.3	576.4
P(26,27) [MW]	240.6	307.9		280.4
연계선로조류 총량[MW]	956.1	947.5	953	955.9
계통손실[MW]	65.6	74.9	66.8	67.8
전압편차의 합[p.u]	0.007	0.006	0.006	0.007

[표 8]

조류량 \ 상정사고	건전	16-21	26-27	14-24
P(25,13) [MW]	53.85	138.5	210.11	107.13
P(24,14) [MW]	219.9	507.5	264.3	
P(21,16) [MW]	447.6		480.9	574.8
P(26,27) [MW]	235.6	303.6		275.5
연계선로조류 총량[MW]	956.95	949.6	955.31	957.43
계통손실[MW]	65.7	74.9	66.8	67.9
전압편차의 합[p.u]	0.007	0.007	0.007	0.007

여기에서 알 수 있듯이, 손실과 전압편차는 거의 변하지 않았지만 연계선로의 조류량이 증가했음을 알 수 있다. 또한, 상정 사고 발생시 선로 열용량 한계에 대한 위험을 경감시킬 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이, 본 발명에서는 교류조류계산에 기반으로 하여 (n-1) 상정사고의 안전도 제약을 고려한 유연송전기기의 최적투입계획 수립방법을 제안 및 개시하였다. 벤더 분해법을 적용하여 각 계통상태마다 수정모드 문제를 통하여 최적운전점과 투입계획에 대한 감도를 계산하여 이를 바탕으로 예방모드 문제에서 전체적인 투입계획을 수립한다. 수정모드 및 예방모드를 동시에 고려함으로써 수정모드만을 고려하였을 경우보다는 경제적 조화성을 향상시킬 수 있다. 또한, 수립된 계획에 따라 계통손실 감소와 전압분포개선이 이루어지거나 목적하는 유효전력을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

뿐만 아니라, 유연송전기기의 적용 예에 따르면, 병렬 유연송전기기인 STATCOM 및 직렬 유연송전기기인 SSSC를 계획 문제의 정식화에 포함하기 위하여 각각의 정적인 모델을 도출하였다. 이 모델을 본 발명에서 제시한 알고리즘(벤더 분해법)에 적용하여 투입목적에 따른 유연송전기기의 투입이 계통의 효율성을 증가시켜 정상 상태뿐만 아니라 각 상정 사고 상태에서의 전력 계통의 유연한 운용을 가능하게 함을 알 수 있다.

이상에서는 본 발명에서 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 또한 설명하였다. 그러나 본 발명은 상술한 실시예에 한정되지 아니하며, 특허 청구의 범위에서 첨부하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 및 균등한 타 실시가 가능할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부한 특허 청구범위에 의해서만 정해져야 할 것이다.

발명의 효과

본 발명에 따르면, 교류 조류 계산에 기초하여 전력 계통 계획, 운전 정책 수립 과정 및 운용 측면에서 안정도 확보를 위해 벤더(benders) 분해법을 이용하여 수정 모드와 예방 모드를 동시에 고려한 (n-1) 상정사고의 안전도 제약 유연송전기기의 최적투입방안을 제시함으로써, 안정도를 유지하면서 최적의 운용 비용으로 운전될 수 있다.

도면의 간단한 설명

도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 유연수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입장치를 도시한 블록도,

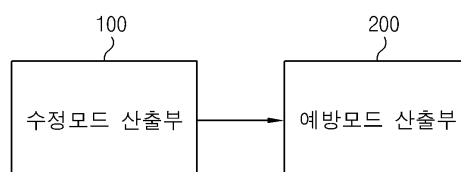
도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 유연수정모드를 고려한 예방모드에서의 유연송전기기 최적투입방법을 도시한 흐름도,

도 3은 STATCOM 최적투입계획에 따른 투입전과 투입 후의 건전 상태 및 각 상정사고 상태에서의 계통 전체 손실을 비교한 그래프도, 그리고

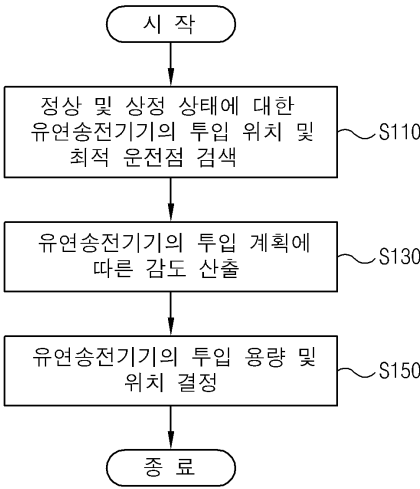
도 4는 STATCOM 최적투입계획에 따른 투입전과 투입 후의 건전 상태 및 각 상정사고 상태에서의 전압편차의 합을 비교한 그래프도이다.

도면

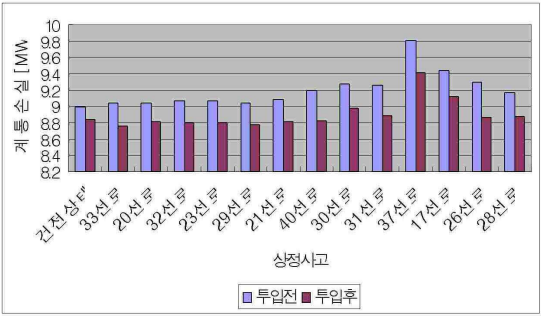
도면1



도면2



도면3



도면4

